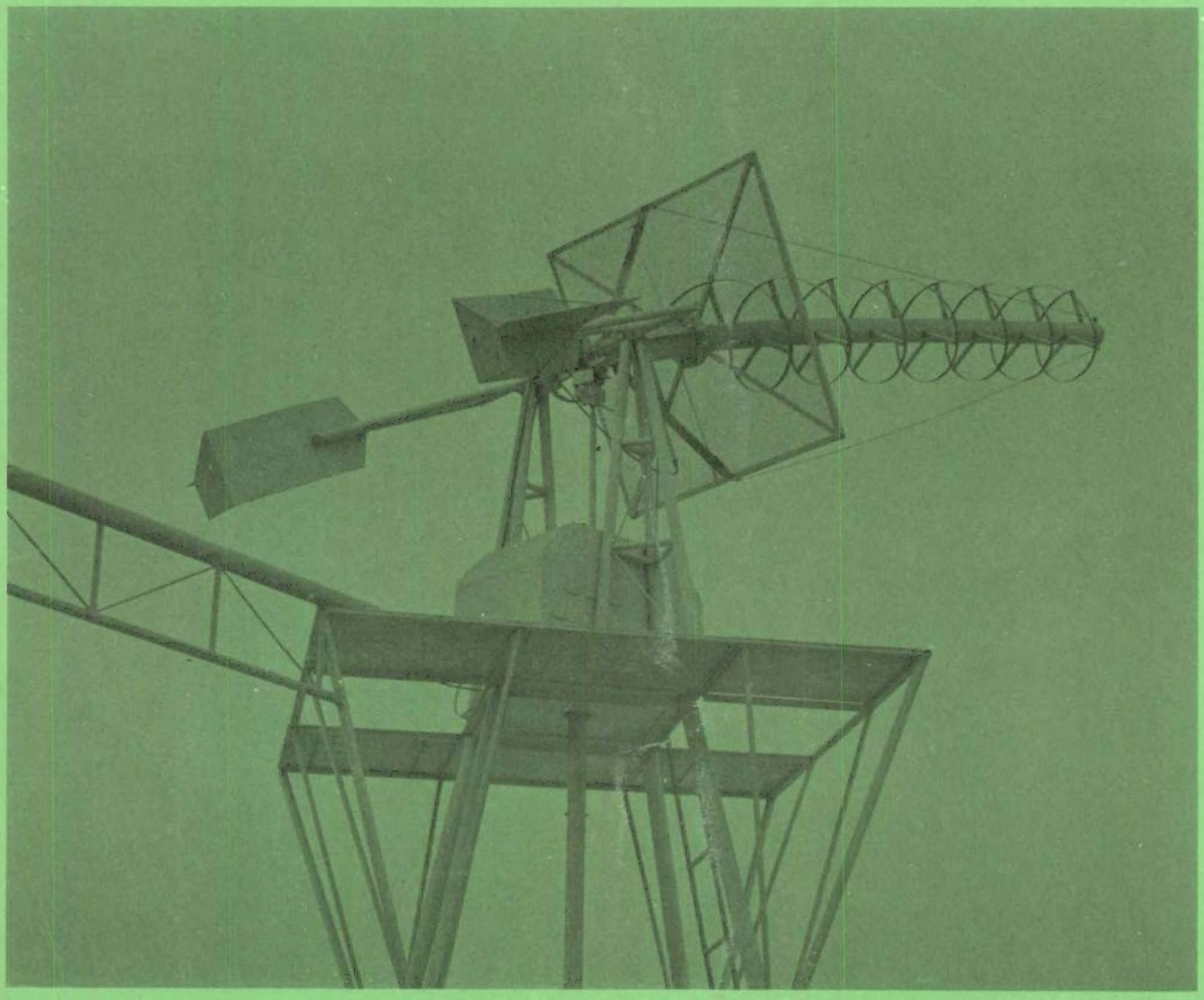
técnica



421 associação dos estudantes do instituto superior técnico
outubro 1974 revista de engenharia

HELIAÇO

VARÕES DE AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA PARA BETÃO ARMADO TIPO A. 40 («Heliaço» e «SNT 40»)

TENSÕES DE SEGURANÇA

Ra = 2400 kg/cm²

e

Ra = 4000 kg/cm² (SISMOS)

Literatura e Tabelas de Cálculo fornecidas gratuitamente

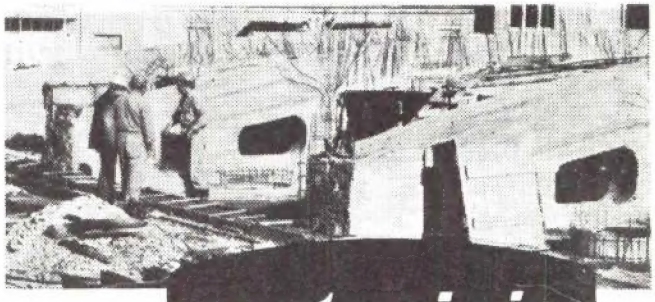
HELIAÇO, LDA.

R. DE S. JULIÃO, 41, 4.º D. — LISBOA

Tel.: 36 78 17 - 32 37 06 - 36 94 77

POST ESFORÇO «LOSINGER»

Sistema de post-esforço e ancoragens para rocha e aluviões.



materiais novobra

A mais vasta gama em pré-fabricados de betão.

Pavimentos, coberturas, asnas, perfis especiais, «post-esforço Losinger», pontões, vigas de grande vão, pórticos «Crendon», pavimento «Trief», protecção de segurança «Trief», mosaicos, tubos, blocos «Leca», espaçadores de betão, estacas para vinhas e pomares e pré-fabricação total ou parcial.

Fábricas em: Lisboa, Leiria, Lagoa, Guarda, Moita, Luanda, Lourenço Marques

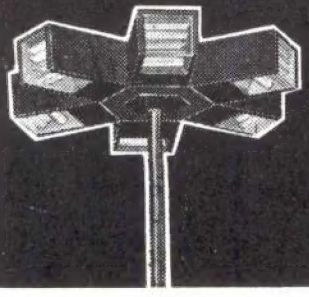
Sede: Av. Est. Unidos da América, 100-5o. Dto. – Lisboa-5

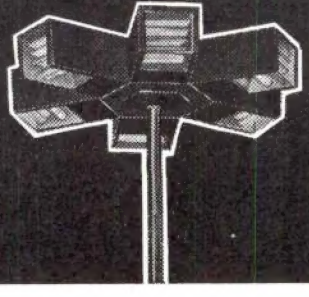
Telefones – Serviços Administrativos: 77 48 32 - 77 29 53

Serviços Técnicos: 71 41 16/7/8 - 71 93 31/2

ARMADURA HI-1

Iluminação é o nosso ofício





SCHRÉDER, S.A.R.L.

Carnaxide — Tel. 219 00 37

técnica

NÚMERO 421 OUTUBRO DE 1974 ANO XLIX VOLUME XXXVI PUBLICAÇÃO MENSAL

DIRECTOR
José de Oliveira Paulo

CHEFE DE REDACÇÃO
Rogério Caldas Pinto

ADMINISTRADOR
Delmar Baptista

SECRETÁRIO
António Maria da Fonseca

REDACTORES
José Agostinho Marques
Jorge Braz
Armando Ruano

DIRECÇÃO, REDACÇÃO E ADMINISTRAÇÃO
Av. Rovisco Pais, I. S. T. — Lisboa
Telefone 72 93 23

PROPRIETÁRIO
A. E. I. S. T.

★

ASSINATURAS:	5 n.os	10 n.os
Continente e Ilhas	95$00	180$.
Países de língua Portuguesa e Espanha	100$00	190$.
Estrangeiro	—	200$.
Número avulso	—	25$.

Não se publica em Agosto e Setembro

Os artigos assinados são da exclusiva responsabilidade dos autores.

★

COMPOSIÇÃO E IMPRESSÃO NA
MOVIGRÁFICA
Rua do Espírito Santo, 19-A - Odivelas

SUMÁRIO

1 — E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA e L. F. GONÇALVES DE AZEVEDO — *O método dos gradiantes conjugados e a sua aplicação na análise de estruturas.*
The conjugated gradiant method and its application in structural analysis

7 — E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA e R. TEIXEIRA DUARTE — *Um método de forças fictícias para a resolução de problemas geometricamente não lineares.*
A fictitious force method for the solution of geometrically non-linear problems.

13 — SALGADO PRATA — *Introdução à mecânica da fractura.*
Introduction to the mechanical fracture.

23 — JOSÉ A. C. SARAIVA MENDES — *Analysis of fade durations on different microwave paths*
Análise da duração do amortecimento em diferentes feixes de microondas.

33 — BETTENCOURT FARIA — *Obtenção de dados meteorológicos através de um satélite artificial.*
Meteorologic satéllites.

CAPA — «Antena helicoidal do Centro Espacial de Mulemba — Angola»

ÍNDICE ALFABÉTICO DOS ANUNCIANTES

	pág.
Aguiar & Melo, Lda.	XVI
Argilex	X
Construções Técnicas	XIII
Construções Schréder	2.ª da capa
Electro-Arco, Lda.	II
Empresa de Cimentos de Leiria	VII
Empresa Electro-Cerâmica	II
Empresa Técnica de Equipamentos Eléctricos	XII
Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações	XI
Fanafel	XI
Guedes & Almeida, Lda.	IV e VI
Harker Sumner	XIV
Heliaço	2.ª da capa
Johann Keller	XIV
Livros Técnicos	V
MAGUE	IX
Novobra, Lda.	2.ª da capa
Sociedade Amadeu Gaudêncio	X
Soc. Electricidade Brown Boveri	XV
Sociedade Portuguesa Cavan	X
S. K. F., Lda.	III
SOLIDAL	VIII
Sondagens e Fundações A. Cavaco	V
Sondagens Ródio, Lda.	IV
Sopecate	II
TUDOR	4.ª da capa

Colabora neste número a seguinte Agência de Publicidade:

SÉRIO PUBLICIDADE, LIMITADA

Publicidade com critério.

Anuncie na

técnica REVISTA DE ENGENHARIA

EMPRESA ELECTRO CERÂMICA

S. A. R. L.

FABRICANTE DE ISOLADORES PARA EQUIPAMENTO DE SUB-ESTAÇÕES TRANSFORMADORES E DE LINHAS DE TRANSPORTE DE ENERGIA EM ALTA TENSÃO

fabrica igualmente

- isoladores de baixa tensão
- pequena aparelhagem electrica em baquelite e porcelana
- tubo plastico "Polivolt" para protecção de condutores
- material em refractário especial para aparelhos de aquecimento

DANIEL VIDAS

SEDE: L. BARÃO DE QUINTELA 3-1º LISBOA
FABRICA-CANDAL-VILA NOVA DE GAIA

EC 61-1

fundações
sondagens

Sopecate

especialista há ¾1/4¾ de século

rua do arsenal 146-2º tlf 36 40 10 · Lisboa

ELECTRO-ARCO, S.A.R.L.

- FABRICANTE DE ELÉCTRODOS E ARAME PARA SOLDADURA AUTOMÁTICA
- EQUIPAMENTO PARA SOLDADURA ELÉCTRICA E OXI-ACETILÉNICA
- ACESSÓRIOS

★

MATERIAL APROVADO POR
AMERICAN BUREAU OF SHIPPING
BUREAU VERITAS
DET NORSKE VERITAS
GERMANISCHER LLOYD
INSTITUTO DE SOLDADURA
LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING

★

SEDE, FÁBRICA E LABORATÓRIOS
Rua Vice-Almirante Azevedo Coutinho, 4
VENDA NOVA — AMADORA
Telefs. 97 63 21 - 97 17 33 - 97 64 71 - 97 06 13
DELEGAÇÃO NO NORTE
Rua Delfim Ferreira, 525
PORTO
Telef. 6 21 24

SKF

A SKF não tem apenas rolamentos de esferas e de rolos .

Temos também rolamentos de agulhas

rótulas e embutes .

Evidentemente, temos do mesmo modo toda a espécie de acessórios para rolamentos.

Além disso a SKF fabrica muitos outros produtos de qualidade.

Rodas e carretos cónicos, por exemplo

Fusos roscados de rolamento de alta precisão que transformam o movimento de rotação em linear.

Fabricamos também machos cassonetes

e brocas .

O mesmo se passa com pontos rotativos .

E muitos sabem que também temos um bom Serviço Técnico.

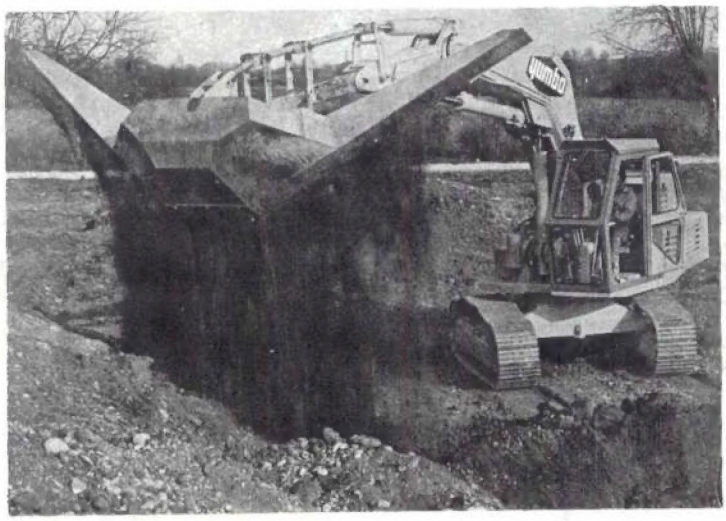
SOCIEDADE SKF LIMITADA

LISBOA - PRAÇA DA ALEGRIA, 66-A
TELEF.: 362301 - TELEGR.: ESKAEF - TELEX: 12156

PORTO - RUA DELFIM FERREIRA, 604
TELEF.: 692054 - TELEGR.: ESKAEF

ESCAVADORAS HIDRÁULICAS
S/RODAS — S/LAGARTAS

— ENTREGAS IMEDIATAS



DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDAL - Guedes & Almeida, Lda.

R. ÁUREA, 181-2.º • LISBOA-2 • TEL. 32 50 80

R. ALFREDO CUNHA, 538 • MATOSINHOS • TEL. 93 45 62

SONDAGENS RODIO, LD.

R. S. Bento, 644 - 3.º
LISBOA

PORTO
LUANDA
BEIRA

TELEFONE: 68 80 96

SONDAGENS GEOLÓGICAS
ESTUDOS GEOTÉCNICOS
CONSOLIDAÇÃO DE FUNDAÇÕES
ESTACAS
PAREDES CONTÍNUAS
IMPERMEABILIZAÇÃO DE OBRAS HIDRÁULICAS
CAPTAÇÃO DE ÁGUAS

RODIO

Dimensionamento de Secções de Betão Armado em Relação à Rotura

Matérias

— Flexão simples de secções rectangulares simplesmente armadas
— Flexão simples de secções rectangulares duplamente armadas
a) com armadura de compressão reduzida
b) com armadura de tracção reduzida
— Flexão simples de secções T duplamente armadas
— Flexão simples de secções T duplamente armadas
— Compressão simples
— Flexão composta de secções rectangulares
a) com armadura simétrica
b) com armadura de tracção reduzida
c) com armadura de compressão reduzida
— Flexão composta desviada de secções rectangulares
— Flexão composta de secções em T
a) com armadura de tracção reduzida
b) comarmadura de compressão reduzida
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares cheias
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares ocas
— Esforço transverso

Preço 150$00

Dimensionamento de Secções Circulares de Betão Armado em Relação à Rotura

Matérias

— Flexão simples e flexão composta de secções circulares cheias
— Flexão simples e flexão composta de secções circulares ocas

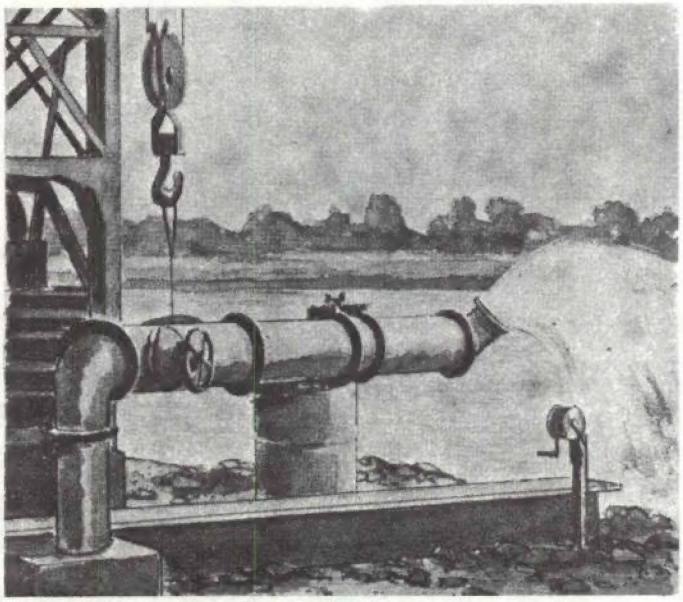
Preço 60$00

Por J. M. MADEIRA COSTA

ENG.º CIVIL

À venda na TÉCNICA e nas LIVRARIAS

Água: eis o que lhe oferecemos!



- Pesquisas e captações de água
- Estudos hidrogeológicos
- Sondagens e Fundações
- Rebaixamento de níveis aquíferos

ACAVACO

R. Rodrigo da Fonseca, 62, r. c-Esq. - Lisboa-1
Tel. 56 11 71/2/3/4

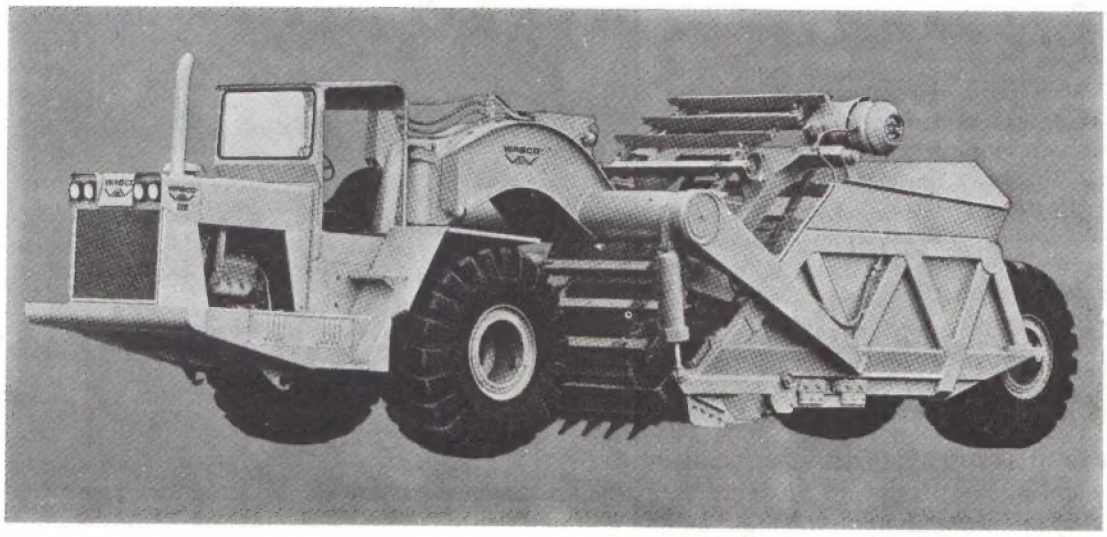
WABCO
An American-Standard Company

MOTO-SCRAPERS AUTO-CARREGADORES

CAPACIDADES ATÉ 34 JARDAS CÚBICAS

NÃO NECESSITA DE TRACTOR PARA EMPURRE!
UMA SÓ MÁQUINA... UM SÓ OPERADOR...

21 UNIDADES EM SERVIÇO



DISTRIBUIDOR EXCLUSIVO

GUEDAL - Guedes & Almeida, Lda.

R. ÁUREA, 181-2.° • LISBOA-2 • TEL. 32 50 80

R. ALFREDO CUNHA, 538 • MATOSINHOS • TEL. 93 45 62

EMPREZA DE CIMENTOS DE LEIRIA

S. A. R. L.

CIMENTO PORTLAND NORMAL

CIMENTO SUPER-VULCANO

CIMENTO VULCANO

CIMENTO HIDROFUGADO LIZ-N

CALCINA

CAL HIDRÁULICA

AGROLIZ

PORTUGAL

SÍMBOLO DE QUALIDADE

Sede:

R. Braamcamp, 7 — LISBOA

Fábrica: **Maceira - Liz**

Delegações:

PORTO — Av. dos Aliados, 41

FARO — Lugar dos Salgados

ELECTRIFICAÇÃO DE
GRANDES EDIFÍCIOS

cabos isolados de ALUMÍNIO MACIÇO armados e não armados

SOLIDAL

COLUNAS MONTANTES ■ ENTRADAS ■ CONDUTORES DE TERRA ■ COLUNAS DE SERVIÇOS GERAIS

GRAÇAS AO REDUZIDO PESO PRÓPRIO:
■ MENOR NÚMERO DE SUPORTES
■ IMPORTANTE REDUÇÃO DE MÃO DE OBRA

COMPLETA GAMA DE ACESSÓRIOS
ASSISTÊNCIA TÉCNICA GRATUITA

SOLIDAL - CONDUTORES ELÉCTRICOS, SARL.
LISBOA-Tel. 674828 · PORTO-Tel. 491392 · ESPOSENDE (FÁBRICA)-Tel. 89306

■ SÉRIO

técnica

NÚMERO 421 OUTUBRO DE 1974 ANO XLIX VOLUME XXXVI PUBLICAÇÃO MENSAL

C. D. U. 624.04:518.6

O MÉTODO DOS GRADIANTES CONJUGADOS E A SUA APLICAÇÃO NA ANÁLISE DE ESTRUTURAS

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA
Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico
L. F. GONÇALVES DE AZEVEDO
Assistente do Instituto Superior Técnico

RESUMO

Mostra-se que a utilização do método dos gradiantes conjugados na resolução dos sistemas de equações associadas com a análise de estruturas torna possível trabalhar directamente com as matrizes de rigidez dos elementos e, deste modo, evitar a formação da matriz de rigidez global.

SUMARY

It is shown that the use of the conjugated gradiant technique in the solution of the systems of equations associated with the analysis of structures makes it possible to work directly with the construction of the global stiffness matrix.

1. INTRODUÇÃO

É sabido que, apesar de se dizer que a formulação matricial da Análise de Estruturas é especialmente adequada ao cálculo automático, essa formulação nunca é totalmente utilizada pelos programadores.

Com efeito, em vez do chamado «stiffness method», estes utilizam o «direct stifness method», muito mais económico, em que a matriz de rigidez não se calcula por operações matriciais a partir das matrizes de rigidez dos elementos, mas por espalhamento [1] («scattering») e acumulação dessas matrizes sobre a matriz de rigidez global da estrutura. É portanto em termos desta técnica que se tem posto a problemáica da análise estrutural.

Constitui objectivo do presente trabalho mostrar que outros processos podem ser utilizados porventura mais convenientes.

O problema está intimamente relacionado com o da resolução de sistemas de equações a que a análise acaba por reduzir-se. Não admira portanto que o assunto da resolução de sistemas de equações seja abordado nas páginas seguintes. Tomar-se-ão como base os capítulos que Odent lhe dedica em [2].

Admite-se que o problema da resolução do sistema pode sempre converter-se no da minimização de um certo funcional.

Lembra-se que, no caso dos sistemas de equações lineares da forma

$$\underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{q} = \underset{\sim}{Q} \tag{1.1}$$

em que $\underset{\sim}{K}$ é uma matriz simétrica e definida positiva, o funcional em questão é

$$F\ (\underset{\sim}{q}) = {}^1/_2\ \underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{q} - \underset{\sim}{Q}^T \underset{\sim}{q} \tag{1.2}$$

Com efeito, diferenciando (1.2), obtém-se

$$\delta\ F = \delta\ \underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{q} - \delta\ \underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{Q} = \delta\ \underset{\sim}{q}^T (\underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{q} - \underset{\sim}{Q}) \tag{1.3}$$

e, portanto, dado que $\delta \underset{\sim}{q}$ é arbitrário, a estacionaridade de F é condição necessária e suficiente para a verificação da equação. (1.1)

Para mostrar que F é mínimo no seu ponto de estacionaridade, há que determinar, diferenciando (1.3), a segunda variação de F. Obtém-se

$$\delta^2\ F = \delta^2\ \underset{\sim}{q}^T (\underset{\sim}{K}\ \underset{\sim}{q} - \underset{\sim}{Q}) + \delta \underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{K}\ \delta \underset{\sim}{q} \tag{1.4}$$

ou, em virtude de se tratar de um ponto de estacionaridade no qual (1.1) se verifica,

$$\delta^2 F = \delta \underset{\sim}{q}^T \underset{\sim}{K} \, \delta \underset{\sim}{q} \qquad (1.5)$$

Logo, visto que $\underset{\sim}{K}$ é matriz definida positiva, $\delta^2 F > 0$, o que revela tratar-se de um mínimo.

Admitir-se-á nas Secções seguintes que o sistema de equações é do tipo (1.1). Alguma coisa se dirá porém ao longo do texto sobre sistemas não lineares.

2. MÉTODOS SEQUÊNCIAS

Os métodos que vão referir-se são do tipo sequencial, isto é, tais que a solução se determina a partir de uma sucessão de soluções aproximadas obtidas mediante uma rotina fixa de operações.

A solução de ordem $r + 1$, q^{r+1} é obtida da de ordem r por uma fórmula do tipo

$$\underset{\sim}{q}^{r+1} = \underset{\sim}{q}^r + \lambda^r \underset{\sim}{D}^r \qquad (2.1)$$

em que o vector $\underset{\sim}{D}^r$ definee a direcção do incremento e λ^r é um escalar que fixa o seu valor.

Na vizinhança de um ponto $\underset{\sim}{q}$ o funcional $F(\underset{\sim}{q})$ é susceptível de desenvolvimento em série de Taylor, isto é,

$$F(\underset{\sim}{q} + \underset{\sim}{h}) = F(\underset{\sim}{q}) + \sum_i h_i \left(\frac{\delta F}{\delta q_i}\right)_{\underset{\sim}{q}} + \frac{1}{2!} \sum_{i,j} h_i h_j \left(\frac{\delta^2 F}{\delta q_i \, \delta q_j}\right)_{\underset{\sim}{q}} \qquad (2.2)$$

A fórmula (2.2) é exacta porque, sendo o funcional quadrático, as suas derivadas de ordem superior à segunda anulam-se todas e os termos seguintes da série são portanto também todos nulos.

Em virtude de (2.2) pode exprimir-se o valor de F no ponto $\underset{\sim}{q}^{r+1}$ em função do seu valor e derivados no ponto $\underset{\sim}{q}^r$. Atendendo a que o incremento é

$$h_i = \lambda^r D^r_i \qquad (2.3)$$

vem

$$F(\underset{\sim}{q}^{r+1}) = F(\underset{\sim}{q}^r) + \lambda^r \sum_i \left(\frac{\delta F}{\delta q_i}\right)_{\underset{\sim}{q}} D^r_i + \frac{(\lambda^r)^2}{2!} \sum_{i,j} \left(\frac{\delta^2 F}{\delta q_i \, \delta q_j}\right)_{\underset{\sim}{q}} D^r_i D^r_j \qquad (2.4)$$

ou, designando por $\underset{\sim}{g}^r$ (gradiante de F no ponto $\underset{\sim}{q}^r$) o vector de componentes $\left(\frac{\delta F}{\delta q_i}\right)_{\underset{\sim}{q}}$ e atendendo a que a matriz de elementos $\frac{\delta^2 F}{\delta q_i \, \delta q_j}$ é a matriz $\underset{\sim}{K}$,

$$F(\underset{\sim}{q}^{r+1}) = F(\underset{\sim}{q}^r) + \lambda^r \underset{\sim}{g}^{rT} \underset{\sim}{D}^r + \frac{(\lambda^r)^2}{2} \underset{\sim}{D}^{rT} \underset{\sim}{K} \underset{\sim}{D}^r \qquad (2.5)$$

Como determinar λ^r ?

É evidente que convém λ^r seja tal que o valor de $F(\underset{\sim}{q}^{r+1})$ se aproxime tanto quanto possível do mínimo, que corresponde à solução exacta.

Nestas condições, não admira que o valor de λ^r seja determinado derivando $F(\underset{\sim}{q}^{r+1})$ em ordem a λ^r e igualmente a zero a derivada.

Ora, derivando ambos os membros de (2.5), obtém-se

$$\frac{\delta F(\underset{\sim}{q}^{r+1})}{\delta \lambda^r} = \underset{\sim}{g}^{rT} \underset{\sim}{D}^r + \lambda^r \underset{\sim}{D}^{rT} \underset{\sim}{K} \underset{\sim}{D}^r = 0 \qquad (2.6)$$

o que dá

$$\lambda^r = - \frac{\underset{\sim}{g}^{rT} \underset{\sim}{D}^r}{\underset{\sim}{D}^r \underset{\sim}{K} \underset{\sim}{D}^r} \qquad (2.7)$$

Como escolher agora os vectores $\underset{\sim}{D}^r$?

Várias técnicas podem ser utilizadas.

Se os incrementos do vector das incógnitas se fizerem sempre de modo que uma única incógnita seja alterada de cada vez, isto é, se todos os elementos dos vectores $\underset{\sim}{D}^r$ forem nulos excepto um, tem-se o chamado método univariante.

Se se fizer

$$\underset{\sim}{D}^r = - \underset{\sim}{g}^r \qquad (2.8)$$

tem-se o chamado método da descida mais íngreme (*) (dado que o gradiante define a direcção da descida mais íngreme).

Mostra-se que, no método da descida mais íngreme, a sucessão de soluções aproximadas converge para a solução exacta se a matriz $\underset{\sim}{K}$ for definida positiva, como se supõe.

No entanto, no método da descida mais íngreme, a solução exacta é em geral atingida após um número infinito de passos.

É portanto bastante mais vantajoso o método que vai passar a ser descrito, dito método dos gradiantes conjugados, no qual a solução exacta se atinge em n passos, em que n é a ordem do sistema de equações.

Convém, antes de continuar, determinar a expressãodo gradiante $\underset{\sim}{g}^r$.

Derivando (1.2) em ordem a $\underset{\sim}{q}$ e particularizando para $\underset{\sim}{q} = \underset{\sim}{q}^r$, obtém-se

$$\underset{\sim}{g}^r = \left(\frac{\delta F}{\delta \underset{\sim}{q}}\right)_{\underset{\sim}{q}^r} = \underset{\sim}{K} \underset{\sim}{q}^r - \underset{\sim}{Q} \qquad (2.9)$$

Tal é a expressão do gradiante.

(*) A literatura de língua inglesa chama-lhe «steepest descent method».

3. MÉTODO DOS GRADIANTES CONJUGADOS

O método diz-se dos gradiantes conjugados porque os vectores $\underset{\sim}{D}^r$ se fazem K-conjugados, isto é, tais que

$$\underset{\sim}{D}^{r\,T}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^s = \underset{\sim}{O} \quad \text{para } r \neq s \tag{3.1}$$

Vai mostrar-se que, se esta condição se verificar, a solução exacta se atinge em n passos.

Observe-se primeiro que, em virtude de (2.1),

$$\underset{\sim}{q}^n = \underset{\sim}{q}^r + \sum_{q=r}^{n-1} \lambda^q \underset{\sim}{D}^q \tag{3.2}$$

em que r pode tomar qualquer valor inteiro entre zero e n — 1.

Multiplicando à esquerda por $\underset{\sim}{K}$, obtém-se

$$\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{q} = \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{q}^r + \sum_{q=r}^{n-1} \lambda^q\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^q \tag{3.3}$$

e, oprtanto, em virtude de (2.9),

$$\underset{\sim}{g} = \underset{\sim}{g}^r + \sum_{q=r}^{n-1} \lambda^q\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^q \tag{3.4}$$

Tira-se de (3.4), considerando a simetria de $\underset{\sim}{K}$,

$$\underset{\sim}{g}^{n\,T}\,\underset{\sim}{D}^r = \underset{\sim}{g}^{r\,T}\,\underset{\sim}{D}^r + \sum_{=r}^{n-1} \lambda_q\,\underset{\sim}{D}^{q\,T}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r \tag{3.5}$$

Impondo agora (3.1), vem

$$\underset{\sim}{g}^{n\,T}\,\underset{\sim}{D}^r = \underset{\sim}{g}^{r\,T}\,\underset{\sim}{D}^r + \lambda^r\,\underset{\sim}{D}^{r\,T}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r \tag{3.6}$$

e, portanto, em virtude de (2.9),

$$\underset{\sim}{g}^{n\,T}\,\underset{\sim}{D}^r = O \tag{3.7}$$

em que r, lembra-se, pode tomar qualquer valor desde zero até n — 1

Admitindo que os sucessivos vectores $\underset{\sim}{D}^r$ são linearmente independentes, (3.7) implica $\underset{\sim}{g}^n$, vector de n elementos, seja ortogonal a n vectores linearmente independentes e, portanto, que

$$\underset{\sim}{g}^n = \underset{\sim}{O} \tag{3.8}$$

Em virude de (2.9), tem-se então

$$\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{q}^n = \underset{\sim}{O} \tag{3.9}$$

o que demonstra o que se pretendia, isto é, que $\underset{\sim}{q}^n$ raíz de (1.1) e, portanto, a convergência em n passos.

Resta um problema: como formar uma sucessão de vectores $\underset{\sim}{D}^r$ que sejam $\underset{\sim}{K}$-conjugados?

Em geral, toma-se

$$\underset{\sim}{D}^o = -\underset{\sim}{g}^o \tag{3.10}$$

como se se tratasse do método da descida mais íngreme.

Adopta-se seguidamente a fórmula de recorrência

$$\underset{\sim}{D}^{r+1} = -\underset{\sim}{g}^{r+1} + p^r\,\underset{\sim}{D}^r \tag{3.11}$$

e determinam-se os β^1 de modo que (3.1) se verifique.

Observa-se que basta impor que cada vector seja K-conjugado do anterior para que o seja, no caso de se verificar a independência linear, de todos os anteriores.

Impõe-se portanto

$$\underset{\sim}{D}^{r+1}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r = -\underset{\sim}{g}^{r+1}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r + \beta^r\,\underset{\sim}{D}^r\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r \tag{3.12}$$

o que fornece

$$\beta^r = \frac{\underset{\sim}{g}^{r+1\,T}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r}{\underset{\sim}{D}^{r\,T}\,\underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{D}^r} \tag{3.13}$$

4. RESUMO DE FÓRMULAS

Parte-se de uma solução inicial $\underset{\sim}{q}^o$.

Tem-se, em virtude de (2.9),

$$\underset{\sim}{g}^o = \underset{\sim}{K}\,\underset{\sim}{q}^o - \underset{\sim}{Q} \tag{4.1}$$

Determina-se seguidamente $\underset{\sim}{D}^o$, por (3.10), e λ^o por (2.7).

Obtém-se $\underset{\sim}{q}^1$ por intermédio de (2.1).

De novo se determina o gradiante, $\underset{\sim}{g}^1$, usando (2.9), depois β usando (3.11), λ^1 usando (2.7), $\underset{\sim}{q}^2$ usando (2.1), e assim sucessivamente.

As operações estão esquematizadas no Organograma I.

Observa-se que, no caso de equações de sistema não serem lineares, a solução exacta não se atinge exactamente em n passos, embora, após os primeiros passos, a convergência se dê muito rapidamente. O Organograma I refere-se a essa situação, prevendo-se portanto a paragem do processo somente quando o quadrado módulo do gradiante, ou seja, a soma dos quadrados dos resíduos, seja inferiores a um número ε que se supõe dado.

5. APLICAÇÃO À ANÁLISE DE ESTRUTURAS

A aplicação do método à análise de estruturas não ofereceria dificuldades especiais se o utilizássemos de modo convencional, isto é, depois de formada a matriz $\underset{\sim}{K}$.

Mas é justamente a formação da matriz $\underset{\sim}{K}$ que se deseja evitar. Mais precisamente, deseja-se resolver o sistema a partir das matrizes de rigidez elementares, $\underset{\sim}{k}^e$.

Na discussão que vai seguir-se, supõe-se que as matrizes $\underset{\sim}{k}^o$ estão formadas, que os nós da estrutura foram dividamente numerados e que faz parte dos dados

o conjunto das listas dos nós dos vários elementos, isto é, uma matriz m de números inteiros, com tantas linhas quantos os elementos e com número de colunas igual ao número de nós de um elemento. O elemento genérico de m, m_{ej}, representa o número de ordem do nó j do elemento e.

Representando por q^e o vector dos deslocamentos associado com o nó j do elemento e, por q, o vector dos deslocamentos associado com o nó I da estrutura, pode escrever-se

$$q^e_j = q_{m_{ej}} \tag{5.1}$$

O vector das forças generalizadas relativas ao nó i do elemento e, Q^e_i, pode pois calcular-se por

$$Q^e_i = \sum_j k^e \; q^e_j = \sum_j k^e_{ij} \; q_{m_{ej}} \tag{5.2}$$

em que k^e_{ij} designa uma submatriz genérica da matriz k^e.

O vector das forças generalizadas globais que resultam dos vectores das forças elementares Q^e pode ser determinado espalhando e acumulando os vectores Q^e sobre o vector Q. Trata-se de uma operação facilmente programável, semelhante à que é habitual realizar-se para construir a matriz K a partir das matrizes k^e. Representa-se essa operação por $\mathop{\mathbf{R}}_{e=1}^{E}$, em que E designa o número de elementos, escrevendo-se

$$Q = \mathop{\mathbf{R}}_{e=1}^{E} (Q^e) \tag{5.3}$$

Se em vez do vector Q, dado por (1.1), se pretender obter o vector

$$H^r = K \; D^r \tag{5.4}$$

poderá proceder-se do mesmo modo, isto é, calculando primeiro os vectores

$$H^{re}_i = \sum_y k^e_{ij} \; D^r_{m_{ej}} \tag{5.5}$$

e em seguida o vector

$$H^r = \mathop{\mathbf{R}}_{e=1}^{E} (H^{re}) \tag{5.6}$$

A análise da estrutura faz-se pois de acordo com o Organograma II.

Faz-se notar que as matrizes k^e poderão ser memorizadas em fita magnética ou discos, sendo chamadas à memória central uma vez por cada iteração. Nos casos de não linearidade física as matrizes k^e deverão ser calculadas de novo em cada iteração, o que não complicará excessivamente o programa.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que é possível analisar estruturas sem chegar a formar a matriz de rigidez global da estrutura, isto é, directamente a partir das matrizes de rigidez dos elementos. Observa-se que em última análise, o espalhamento e acumulação sobre uma matriz são substituídos pelo espalhamento e acumulação sobre um vector.

Trata-se de uma conclusão que modifica completamente os termos em que o problema da programação da análise de estruturas costuma ser posto.

A experiência dirá se o novo método oferece reais vantagens, tanto nos casos lineares como nos não-lineares para os quais parece muito especialmente adequado.

AGRADECIMENTO

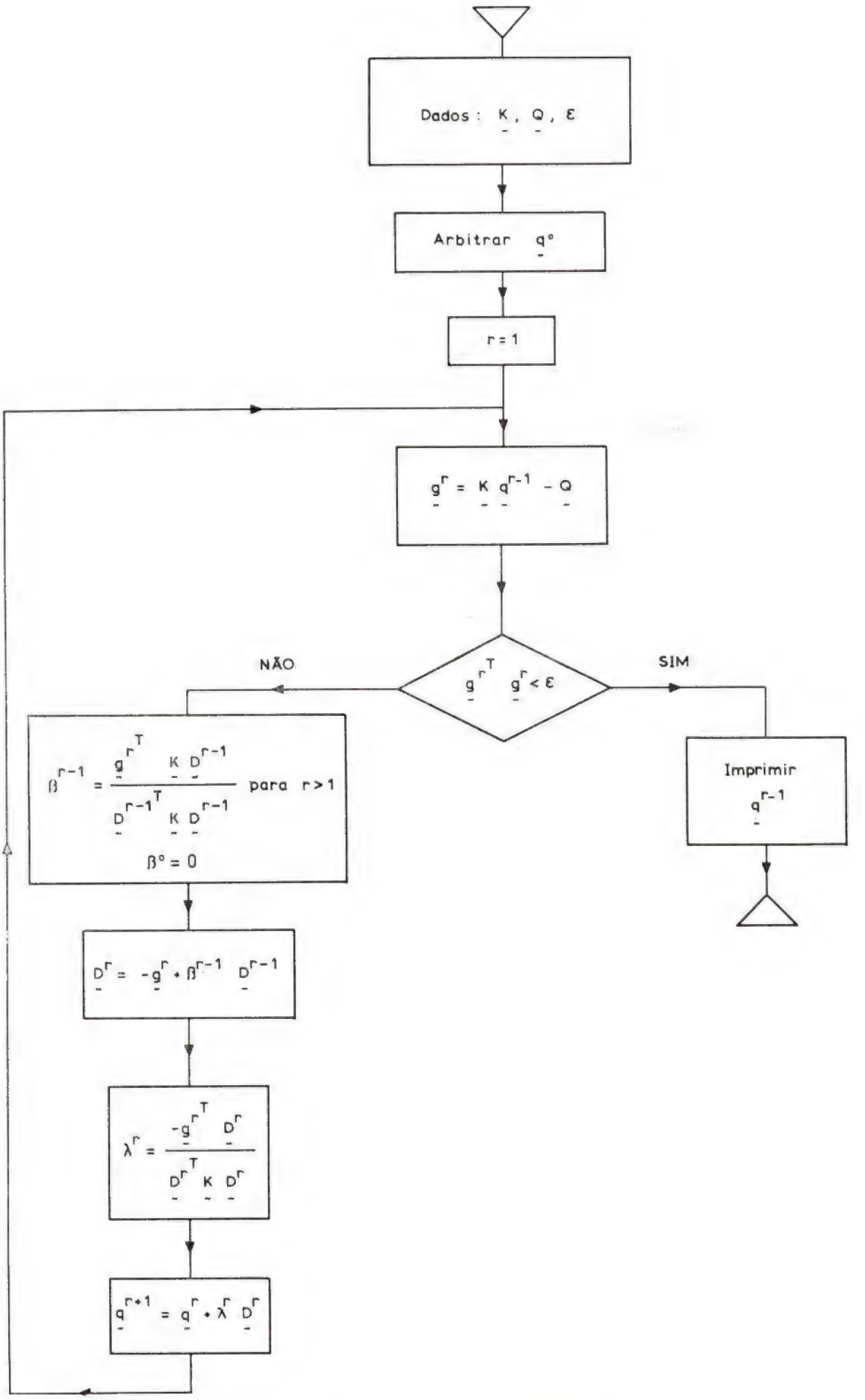
A investigação a que se refere o presente trabalho foi financiada pela Fundação Calouste Gulbenkian através do projecto «Matemáticas Aplicada à Engenharia Civil» confiado ao Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

REFERÊNCIAS

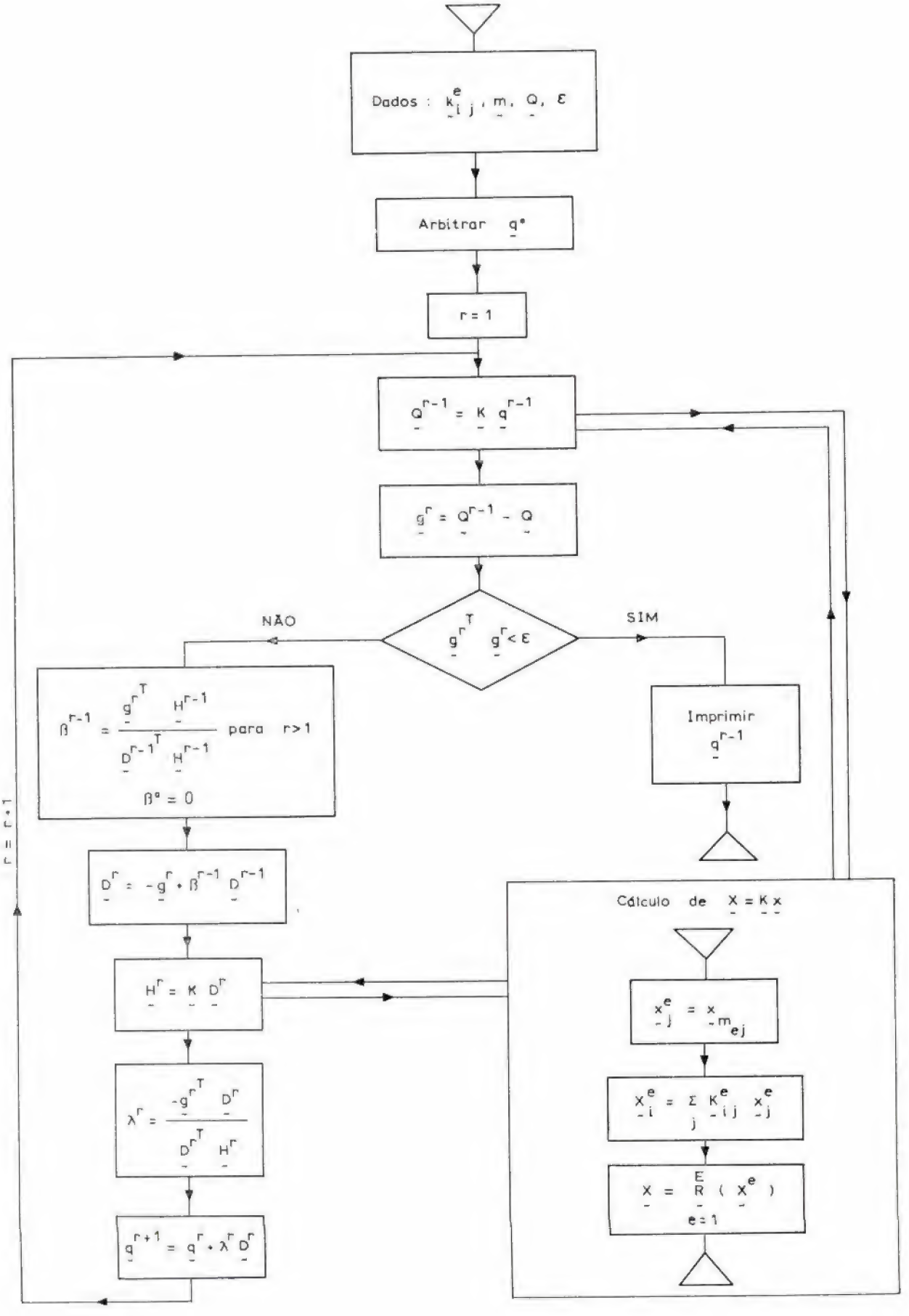
(1) — HALL, A. S. — «Frame Analysis».

(2) — ODEN, J. T. — «Finite Element of Non-Linear Continua», Ms Graw-Hill, New York, 1972.

ORGANOGRAMA I



ORGANOGRAMA II



MAGUE

«Fornecimento de 20 Guindastes eléctricos para a Administração Geral do Porto de Lisboa, com 3 e 6 toneladas de capacidade e 24 m de alcance.»
(na fotografia, 5 desses Guindastes já em serviço)

PONTES ROLANTES, GUINDASTES E APAR. DE ELEVAÇÃO ESPECIAIS	*Projecto e fabrico*
TURBINAS HIDRÁULICAS	*Fabrico segundo licença de A. C. M. de Vevey, S. A.*
TURBINAS A VAPOR	*Fabrico segundo licença de Brown Boveri, Cie.*
CALDEIRAS A VAPOR	*Projecto e fabrico segundo licença de Foster Wheeler, Co.*
EQUIPAMENTOS E INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS	

CONSTRUÇÕES METALOMECANICAS **MAGUE** S.A.R.L

ALVERCA DO RIBATEJO — PORTUGAL

SOCIEDADE DE CONSTRUÇÕES

AMADEU GAUDÊNCIO

LIMITADA

SEDE — R. ALEXANDRE BRAGA, 4-A — LISBOA
Tel. 56 00 51 — Telg. CONSTRUÇAO
R. CASAL DO PEDRO, 7 — MASSARELOS — PORTO
Telefone 69 12 45

Mais de 50 anos de experiência

CONSTRUÇÕES
CIVIS E INDUSTRIAIS
BETÃO
ARMADO E PRÉ-ESFORÇADO
CARPINTARIA
ESTUQUES
PINTURAS

BLOCOS DE ALVENARIA
E PAVIMENTO

BETÕES DE ISOLAMENTO
E DE ENCHIMENTO

BETÕES RESISTENTES
E REFRACTÁRIOS

PRÉFABRICADOS

PAINEIS PAREDE

Leca

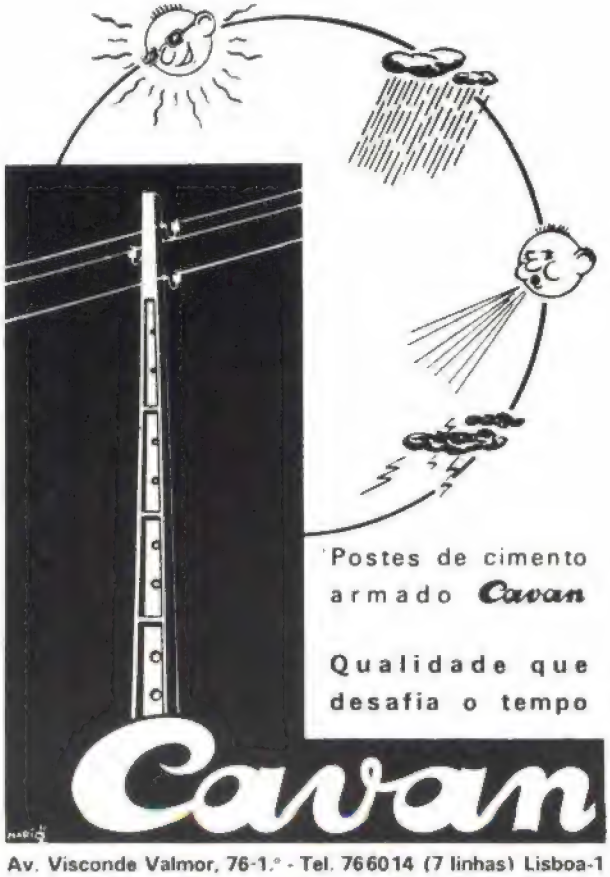
Leca

ARGILA EXPANDIDA

O INERTE RESISTENTE, LEVE, ISOLANTE

Leca

ARGILEX S. A. R. L.
Rua Castilho, 39 — 8.º A
Telef. 4 78 62 LISBOA 1



Av. Visconde Valmor, 76-1.º - Tel. 766014 (7 linhas) Lisboa-1

Já pensou...

... que o seu anúncio
é muito eficaz se for
publicado na revista que
os seus clientes lêem?
Os milhares de exemplares
de cada número da nossa revista
são lidos por engenheiros
e técnicos, por pessoas ligadas
à indústria, à investigação, ao
ensino, pelos seus clientes,
em suma. Consulte-nos

técnica REVISTA DE ENGENHARIA

Avenida Rovisco Pais - Lisboa 1 - Telef. 73 15 49

C. D. U. 539.31:518.6

UM MÉTODO DE FORÇAS FICTÍCIAS PARA A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS GEOMÉTRICAMENTE NÃO LINEARES

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA
Professor Catedrático do Instituto Superior Técnico
R. TEIXEIRA DUARTE
Estagiário para especialista do
Laboratório Nacional de Engenharia Civil

RESUMO

Apresenta-se um método para a resolução de problemas geometricamente não lineares caracterizado pela utilização de forças fictícias obtidas sem qualquer recurso a integrações sobre os elementos ou à forma não-linear das equações deformações-deslocamentos.

SUMARY

A method for the solution of geometrically non-linear problems is presented which is characterized by the use of fictitious forces obtained without resorting to integrations over the elements or to the non-linear form of the strain-displacement equations.

1. INTRODUÇÃO

O objectivo da presente comunicação é a apresentação de um método para a resolução de problemas geometricamente não-lineares, o qual parece ter vantagens substanciais em relação a outros de que os autores têm conhecimento.

Na resolução de problemas geometricamente não-lineares há dois aspectos a considerar. O primeiro é o da formulação do problema, isto é, o da escrita das equações que têm de ser resolvidas. O segundo é o da resolução dessas equações.

A presente comunicação refere-se essencialmente ao primeiro aspecto. Quanto ao segundo, que só nos interessou passageiramente ao elaborarmos os exemplos numéricos, deixamo-lo para posterior consideração. Observamos contudo que a experiência colhida com outros métodos pode ser facilmente aproveitada e que o assunto tem sido objecto das atenções de vários autores, entre os quais mencionamos Oden [1] e Marçal. [1]

A apreciação das várias formulações que têm servido de base à resolução do problema numérico está também fora do âmbito do presente trabalho.

Indica-se no entanto que uma revisão e síntese dos vários métodos que têm sido utilizados foi recentemente apresentada por Stricklin e outros. [2]

Na comunicação de Stricklin são essencialmente considerados dois tipos de formulações: a formulação totalmente Lagrangeana, que utiliza as coordenadas dos pontos na configuração inicial, e o método das coordenadas móveis, em que o sistema de coordenadas vai variando com a carga, e que só não é denominado formulação Euleriana porque a variação da carga se faz de modo discreto, por incrementos finitos, dentro de cada incremento, utilizada a formulação Lagrangeana.

No primeiro caso, a consideração dos termos não-lineares nas relações deformações-deslocamentos que, no caso de Elasticidade tridimensional, são

$$\varepsilon_{ij} = {}^1/_2\,(u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i}\ u_{k,j}) \qquad (1)$$

conduz à utilização de forças fictícias, funções dos deslocamentos, cujas expressões envolvem integrais estendidos ao domínio.

No segundo caso, a consideração dos mesmos termos conduz a uma matriz de rigidez dita geométrica, que se adiciona à matriz de rigidez elástica e cujos elementos são também calculados por meio de integrações.

O método que seguidamente se apresenta pode considerar-se Euleriano. Conduz também à introdução de forças fictícias, mas o cálculo destas é muito mais simples que na formulação totalmente Lagrangeana já referida.

2. DETERMINAÇÃO DAS FORÇAS FICTÍCIAS. CASO GERAL

Seguindo a notação utilizada noutros trabalhos do autor, [3] as equações de qualquer modelo estrutural podem tomar a forma

equações de equilíbrio ..... $\underset{\sim}{E}\ \underset{\sim}{s} = \underset{\sim}{f}$ (2)

equações deformações-deslocamento... $\underset{\sim}{e} = \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{u}$ (3)

equações tensões-deformações ..... $\underset{\sim}{s} = \underset{\sim}{H}\ \underset{\sim}{e}$ (4)

desde que se admita, para simplificar, a linearidade física.

E e D são operadores diferenciais e H é uma matriz simétrica de coeficientes. Denotam-se por s, e e u os vectores das tensões, deformações e deslocamentos.

Se as equações forem escritas, como se supõe (formulação Euleriana), para um sistemade coordenadas associado ao corpo deformado, o operador E é linear. Quanto ao operador D, só poderá transformar-se num operador linear D, se se desprezarem certos termos. Isto pode fazer-se, no caso de tanto as deformações como as rotações serem muito pequenas, isto é, no caso de ser válida a chamada hipótese dos pequenos deslocamentos.

É sempre possível, no entanto,, decompor o campo u em duas parcelas, $\underset{\sim}{\bar{u}}$ e $\underset{\sim}{\hat{u}}$,

$$\underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{\bar{u}} + \underset{\sim}{\hat{u}} \qquad (5)$$

das quais $\bar{u}$ corresponde a pequenas deformações e rotações. Nessas condições, tem-se

$$\underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{D_L}\ \underset{\sim}{\bar{u}} + \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{\hat{u}} \qquad (6)$$

Associando (3), (5) e (6), obtém-se pois

$$\underset{\sim}{e} = \underset{\sim}{D_L}\ (\underset{\sim}{u} - \underset{\sim}{\hat{u}}) + \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{\hat{u}} \qquad (7)$$

Eliminando as tensões e deformações no sistema de equações (2), (4) e (7), conseguem-se as equações de Navier modificadas

$$\underset{\sim}{E}\ \underset{\sim}{H}\ \underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{u} = \underset{\sim}{f} + \underset{\sim}{f_f} \qquad (8)$$

em que

$$\underset{\sim}{f_f} = -\underset{\sim}{E}\ \underset{\sim}{H}\ (\underset{\sim}{D} - \underset{\sim}{D_L})\ \underset{\sim}{\hat{u}} \qquad (9)$$

é o vector das forças fictícias.

Claro que nos dificulta a utilização da equação (9) é a determinação do campo $\hat{u}$, isto é, de um campo de deslocamentos suficientemente próximo de u para que a diferença seja um campo de pequenos deslocamentos.

O problema resolve-se se se considerar um sucessão de estados, suficientemente próximos uns dos outros para que, em cada um, possa tomar-se para campo $\hat{u}$ o campo de deslocamentos do estado anterior, sendo conhecido o do estado inicial.

É o que acontece se se supuser a carga variando por sucessivos incrementos a que correspondam pequenas variações dos deslocamentos. O campo de deslocamento $\hat{u}$ inicial pode então tornar-se como nulo, se nula for também a carga inicial.

Observa-se que, procedendo deste modo, o problema não-linear se transforma numa sucessão de problemas lineares, visto que o operador D_L, que aparece no primeiro membro da equação (8) é um operador linear.

O problema simplifica-se ainda no caso especial de o campo de deslocamentos $\hat{u}$ ser um deslocamento de corpo rígido, o que poderá acontecer se as deformações forem muito pequenas e as rotações tiverem pequenas variações no domínio Δ correspondente ao corpo, isto é, se o campo de deslocamentos do corpo estiver muito próximo de um deslocamento de corpo rígido.

Então, com efeito,

$$\underset{\sim}{D}\ \underset{\sim}{\hat{u}} = \underset{\sim}{0} \qquad (10)$$

e a expansão das forças fictícias é

$$\underset{\sim}{f_f} = \underset{\sim}{E}\ \underset{\sim}{H}\ \underset{\sim}{D_L}\ \underset{\sim}{\hat{u}} \qquad (11)$$

A simplificação provém sobretudo de as forças fictícias poderem ser calculadas sem que seja necessário conhecer ou utilizar as relações deformações-deslocamentos não-lineares. Basta conhecer o operador D_L, isto é, a forma linear das relações deformações-deslocamentos.

O campo $\hat{u}$ poderá ainda ser definido seccionalmente, subdividindo o domínio em sub-domínios suficientemente pequenos para que, dentro de cada um deles, o campo de deslocamentos esteja muito próximo de um deslocamento de corpo rígido, desde que se tome evidentemente o cuidado de não prejudicar a continuidade das componentes do deslocamento total sobre as fronteiras dos subdomínios.

Este último processo torna-se especialmente vantajoso se se discretizar a estrutura, empregando o método dos elementos finitos.

3. APLICAÇÃO AO MODELO DISCRETO

No modelo discreto, o domínio é um conjunto de subdomínios correspondentes a elementos finitos.

Para cada elemento, podem considerar-se vectores das tensões, deformações e deslocamentos, $\underset{\sim}{s^e}$, $\underset{\sim}{e^e}$ e $\underset{\sim}{u^e}$ e um vector das forças exteriores actuantes no elemento, $\underset{\sim}{f^e}$. As equações válidas para um elemento genérico, escritas para o estado de deformações que se pretende analisar, tomam a forma

equações de equilíbrio ..... $\underset{\sim}{E^e}\ \underset{\sim}{s^e} = \underset{\sim}{f^e}$ (12)

equações deformações-deslocamentos $\underset{\sim}{e^e} = \underset{\sim}{D^e}\ \underset{\sim}{u^e}$ (13)

equações tensões-deformações ..... $\underset{\sim}{s^e} = \underset{\sim}{H^e}\ \underset{\sim}{e^e}$ (14)

Admitindo a hipótese dos pequenos deslocamentos, pode tomar-se, em vez de D^e, um operador linear $\underset{\sim}{D^e_L}$. É então possível demonstrar que

$$\underset{\sim}{E^e} = \underset{\sim}{D^e_L}^T \qquad (15)$$

Às equações (12), (13) e (14) há que associar as equações de compatibilidade

$$\underset{\sim}{u}^e = \underset{\sim}{A}^e \, \underset{\sim}{U} \tag{16}$$

e de equilíbrio

$$\sum_e \underset{\sim}{A}^e \, \underset{\sim}{f}^e = \underset{\sim}{F} \tag{17}$$

globais da estrutura.

Não sendo válida a hipótese dos pequenos deslocamentos, $\underset{\sim}{u}^e$ pode decompor-se em duas parcelas, $\underset{\sim}{u}^e$ e $\underset{\sim}{\hat{u}}^e$,

$$\underset{\sim}{u}^e = \underset{\sim}{\bar{u}}^e + \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{18}$$

representando $\underset{\sim}{\hat{u}}^e$ um campo de pequenos deslocamentos.

Tem-se

$$\underset{\sim}{D}^e \, \underset{\sim}{u}^e = \underset{\sim}{D}^e_L \, \underset{\sim}{\bar{u}} + \underset{\sim}{D}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{19}$$

e, portanto,

$$\underset{\sim}{e}^e = \underset{\sim}{D}^e_L \, (\underset{\sim}{u}^e - \underset{\sim}{\hat{u}}^e) + \underset{\sim}{D}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{20}$$

Combinando (12), (14) e (20), e atendendo a (15), obtém-se

$$\underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{u}^e = \underset{\sim}{f}^e + \underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e - \underset{\sim}{D}^{e\,T}_L \, \underset{\sim}{H}^e \, \underset{\sim}{D}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{21}$$

em que

$$\underset{\sim}{k}^e = \underset{\sim}{D}^{e\,T}_L \, \underset{\sim}{H}^e \, \underset{\sim}{D}^e \tag{22}$$

é a matriz rigidez do elemento.

A equação (21) pode simplificar-se se as deformações forem muito pequenas e se as dimensões do elemento forem suficientemente limitadas para que, dentro dele, as variações das rotações sejam também muito pequenas.

Então, com efeito, o deslocamento $\underset{\sim}{u}^e$ estará muito próximo de um deslocamento rígido que poderá ser tomado para deslocamento $\underset{\sim}{\hat{u}}^e$. Tem-se pois

$$\underset{\sim}{D}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e = \underset{\sim}{0} \tag{23}$$

e a equação (21) simplifica-se para

$$\underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{u}^e = \underset{\sim}{f}^e + \underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{24}$$

Introduzindo (16) em (24) e (24) em (17), obtém-se finalmente

$$\sum_e (\underset{\sim}{A}^{e\,T} \, \underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{A}^e) \, \underset{\sim}{U} = \underset{\sim}{F} + \underset{\sim}{F}_f \tag{25}$$

sendo

$$\underset{\sim}{F}_f = \sum_e \underset{\sim}{A}^{e\,T} \, \underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{26}$$

o vector das forças fictícias.

Este vector pode pois ser determinado calculando primeiro, para cada elemento, o vector

$$\underset{\sim}{f}^e_f = \underset{\sim}{k}^e \, \underset{\sim}{\hat{u}}^e \tag{27}$$

das forças fictícias elementares associadas com o deslocamento rígido do elemento, $\underset{\sim}{\hat{u}}^e$, e, seguidamente, determinando para cada nó da estrutura as resultantes das forças nodais elementares dos nós dos elementos que com ele coincidam, exactamente como se se tratasse de forças reais.

No que se refre ao cálculo do vector $\underset{\sim}{\hat{u}}^e$, há que repetir o que se disse na Secção anterior. Poderão pois considerar-se incrementos de carga, definindo vários estados sucessivos e, em cada um destes, tomar para deslocamento de corpo rígido, $\underset{\sim}{\hat{u}}^e$, o definido pela translação e rotação aproximadamente médias do elemento no estado anterior.

4. PROGRAMA DE CÁLCULO AUTOMÁTICO

Com o objectivo de experimentar o método exposto em 3, elaborou-se um programa de cálculo automático que se designou por METFORFIC (método das forças fictícias).

Numa primeira versão, o programa permite a análise geometricamente não linear (grandes deslocamentos mas pequenas deformações) de estruturas articuladas planas com barras rectas de secção constante. Numa segunda versão, as barrras passaram a apresentar rigidez de flexão.

Supõe-se que a carga varia por incrementos mantendo-se, em cada estado, proporcional (factor de proporcionalidade α) a um vector de forças exteriores $\underset{\sim}{F}$.

Dos dados fazem parte:

- — número total de nós, apoios e barras;
- — módulo de elasticidade;
- — coordenadas de nós;
- — número dos nós extremos de cada uma das barras;
- — comprimentos das barras e áreas das secções transversais respectivas;
- — componentes do vector $\underset{\sim}{F}$;
- — lista dos valores de α; a seguir a cada um é necessário fornecer um dos valores boleanos T ou F, conforme se deseja que sejam ou não impressos os resultados correspondentes.

A lista de dados apresentados presupõe evidentemente uma numeração prévia dos nós da estrutura. Impõe-se a condição de que os apoios sejam numerados em último lugar.

Observa-se que os valores de α podem ser repetidos. A tais repetições correspondem iterações que podem melhorar a solução correspondente ao valor de α respectivo, sendo possível impor, ou o número de repetições ou o erro máximo admissível.

5. EXEMPLOS DE APLICAÇÃO

5.1 *Determinar o diagrama F - δ relativo à estrutura representadas na fig. 1*

A estrutura é constituída por duas barras articuladas nas extremidades. A força F é vertical e actua no ponto de cruzamento das duas barras. O deslocamento δ é o deslocamento do ponto de aplicação da força.

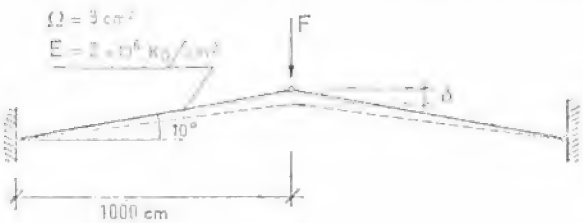


Fig. 1

Trata-se de um problema cuja solução exacta se determina facilmente, pelo que é tradicional escolhê-la para o ensaio de técnicas de tratamento de problemas geometricamente não-lineares.

Tendo em vista que a um mesmo valor de F podem corresponder vários valores de δ, e que o diagrama F-δ apresenta pontos em que a tangente é paralela ao eixo dos δ, não convém fixar incrementos da força mas incrementos do deslocamento.

Como o programa METFORFIC não permite a fixação de incrementos de deslocamentos, recorreu-se ao artifício de considerar uma barra suplementar vertical, de rigidez muito grande em comparação com a da estrutura inicial (fig. 2).

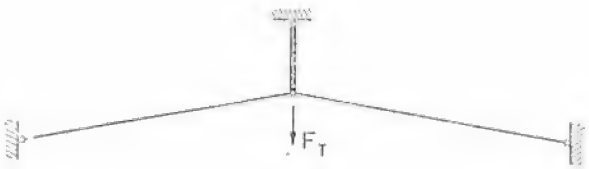


Fig. 2

A força total F_T passou a ser absorvida pela barra suplementar (parcela F_s) e pela estrutura inicial (parcela F). Como a barra é de muito maior rigidez, F é praticamente igual a F_T, e o deslocamento δ é praticamente igual a $\frac{F_T\, l_s}{(E\Omega)_s}$, em que $(E\Omega)_s$ e l_s são respectivamente, a rigidez e o comprimento da barra suplementar. Impor F_T é pois praticamente impor o deslocamento, e o diagrama F-δ da estrutura inicial (fig. 1) é o diagrama F-δ da estrutura transformada (fig. 2).

Procurou-se conseguir em 80 passos o deslocamento máximo de 400 cm, obtendo-se o diagrama da fig. 3.

Na fig. 4 representa-se a variação da força fictícia com o deslocamento. Pode observar-se que a força fictícia toma valores muito maiores que a força F efectivamente aplicada.

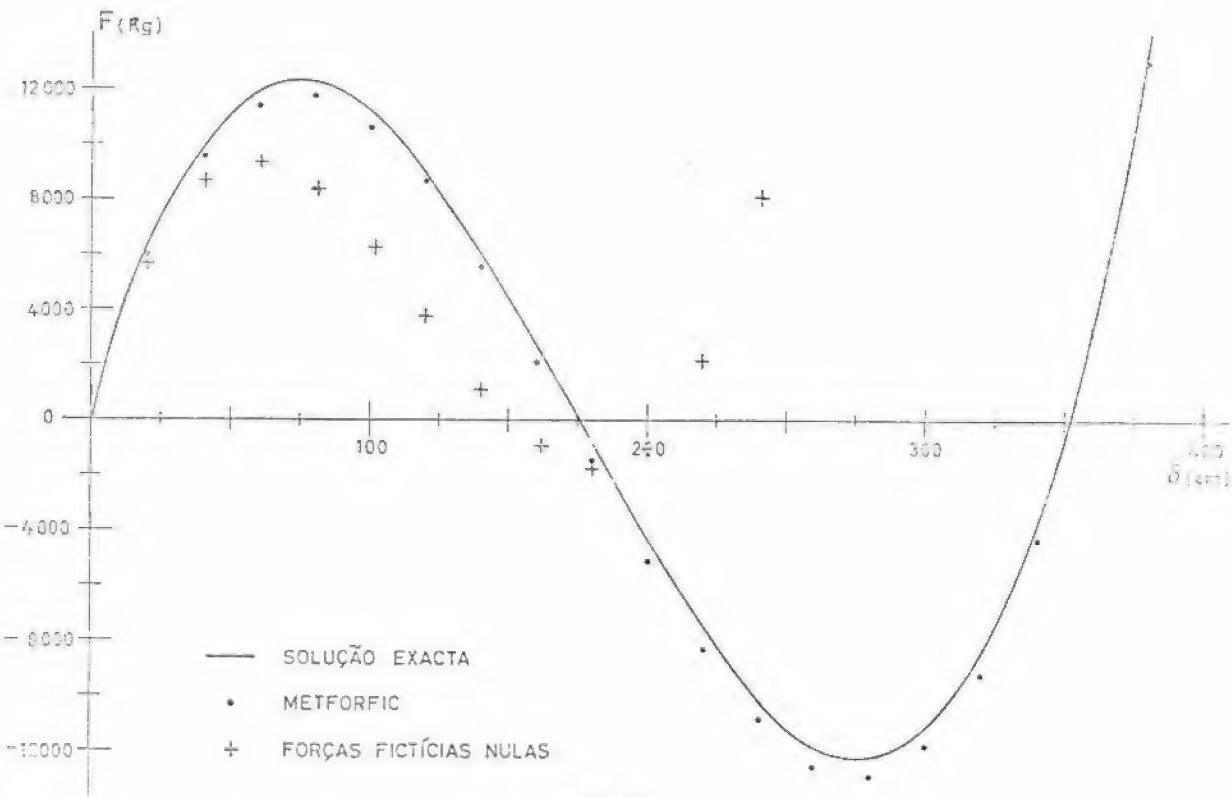


Fig. 3

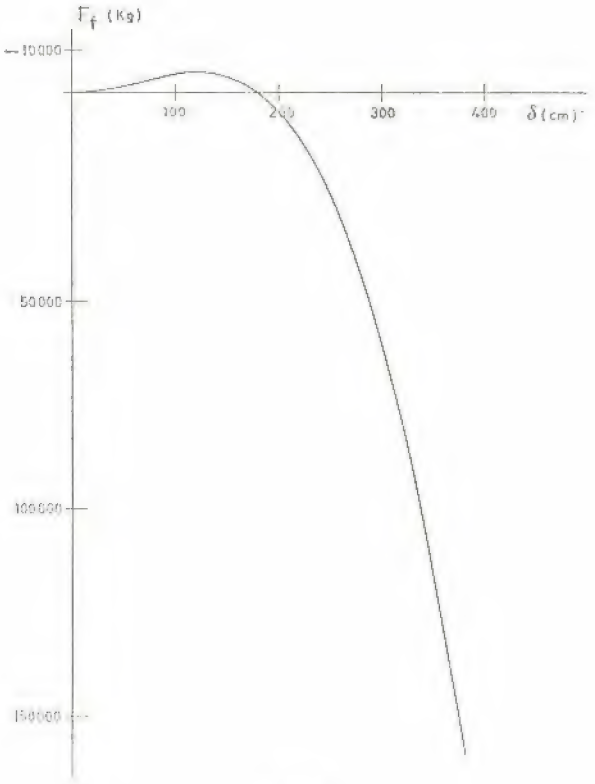


Fig. 4

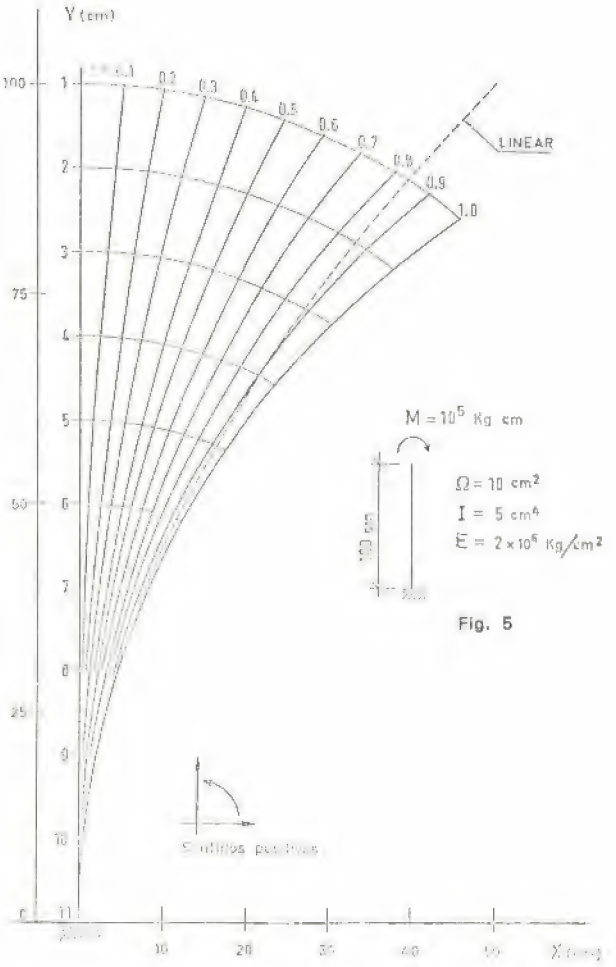


Fig. 5

Fig. 6

Apresentam-se ainda na fig. 3 os resultados (cruzes) que se obteriam se, embora considerando a progressiva alteração de geometria da estrutura, para efeitos de cálculo das sucessivas matrizes de rigidez, se supusessem nulas as forças fictícias.

5.2 *Determinar a deformada de uma barra de secção constante encastrada numa extremidade e solicitada na outra por um momento (fig. 5).*

Trata-se também de um problema de solução bem conhecida. Sabe-se que a teoria linear atribui à consola a forma de uma parábola, e que a forma exacta, dentro do quadro da Teoria da Elasticidade com deslocamentos finitos, é a circular.

Dividiu-se a consola em 10 elementos e atingiu-se o momento aplicado de 10^5 Kgcm, correspondente à rotação de 1 radiano do seu ponto de aplicação, por meio de 10 incrementos iguais da carga. Em cada nível de carga efectuaram-se iterações até se reduzir o erro relativo (*) dos deslocamentos a 10^{-4}. O número de derá ter interesse muito especial no estudo de estados iterações consta do Quadro I:

QUADRO I

N.° de ordem do incremento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N.° de iterações	3	4	4	5	5	5	6	6	7	8

Obtiveram-se para valores finais das coordenadas da extremidade da consola os valores que, no Quadro II, são comparados com os exactos e o obtidos pela teoria linear ($u = \frac{ML^2}{2EI}$; $v = 0$; $\theta = \frac{ML}{EI}$).

(*) Isto é: fez-se $|\underset{\sim}{u}^{(n+1)} - \underset{\sim}{u}^{(n)}| \leqslant |\underset{\sim}{u}^{(n)}| \, 10^{-4}$, sendo $\underset{\sim}{u}^{(r)}$ o deslocamento correspondente à iteração de ordem m .

QUADRO II

	x (cm)	y (cm)	θ
Valores obtidos	45,99	84,18	0,99999993
Valores exactos	45,96	84,15	1,00
Teoria linear	50	100	1

As trajectórias dos nós dos elementos e as deformadas sucessivas podem ser apreciadas na fig. 6. Compare-se a deformada final com a correspondente à teoria linear.

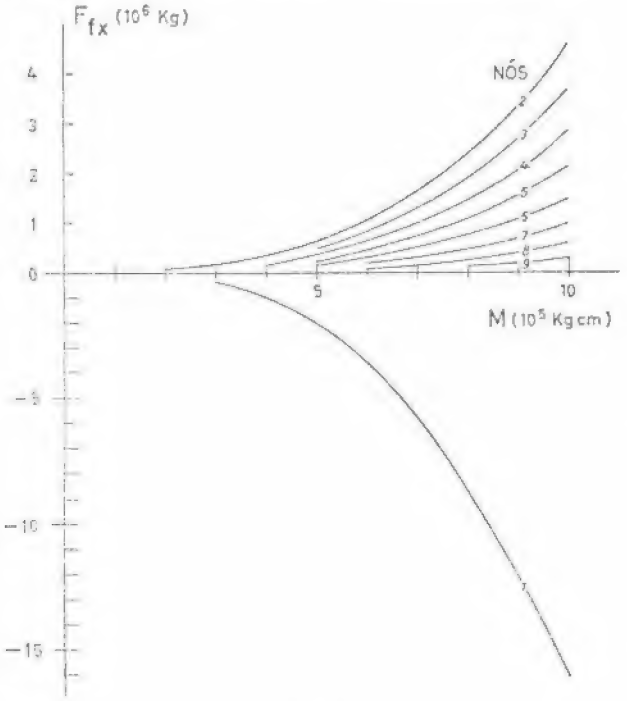
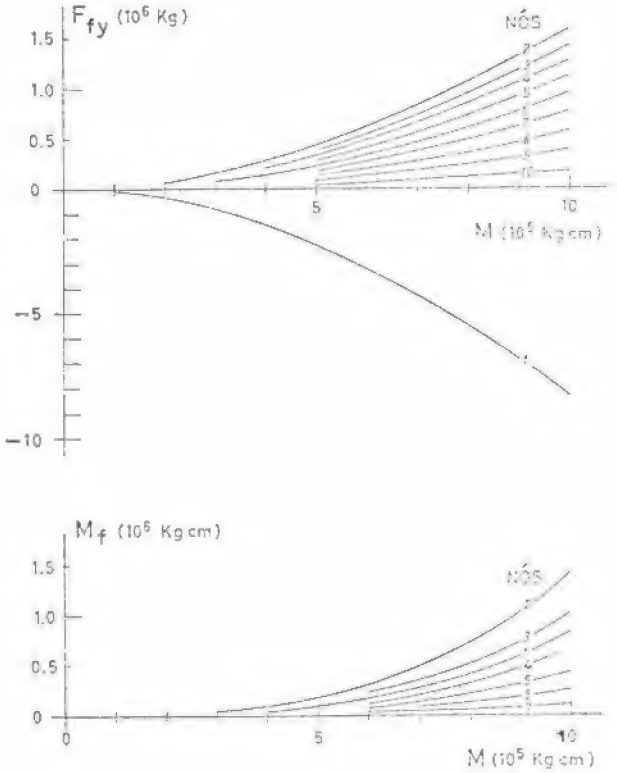


Fig. 7

A fig. 7 mostra como as forças fictícias evoluem coma carga.



6. CONCLUSÕES

O presente trabalho pretende unicamente apresentar o método e, com o auxílio de dois exemplos simples, demonstrar a sua aplicabilidade.

Requere-se agora uma exploração sistemática das respectivas possibilidades, particularmente no tratamento de problemas de instabilidade. Julga-se que poderá ter interesse muito especial no estudo de estados de pós-encurvadura. Impõe-se também uma comparação com outros métodos até agora utilizados. Tudo isso fica porém para trabalhos futuros.

AGRADECIMENTO

A investigação a que se refere o presente trabalho foi financiada pela Fundação Caloutre Gulbenkian através do projecto «Matemáticas Aplicadas à Engenharia Civil» confiado ao Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior Técnico.

Os autores desejam ainda manifestar o seu reconhecimento ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em cujo computador todos os cálculos foram efectuados.

REFERÊNCIAS

(1) — ODEN, J. T.; OLIVEIRA, E. R. A. — «The NATO lectures on Finite Elementts in Continuum Mechanics», UAH Press, Huntsville, 1972.

(2) — STRICKLIN, J. A.; RIESEMANN, W. A. von; TILLERSON, J. R.; HAISLER, W. E. — «Survey of Static Geometrical and Marterial Nonlinear Analysis by the Finite Element Method», paper presented at the Second U. S. — Japan Sem. on Mat. Met. in Struct. Mech., Berkeley, 1972.

(3) — OLIVEIRA, E. R. A. — «The Convergence Theorems and their Role in the Theory of Structures», IUTAM Symposium on High Speed Computing of Elastic Structures, Liège, 1970.

DESPOEIRAGEM

FILTROS TECIDOS EM PEÇAS, PANOS, SACOS, MANGAS

DE QUALQUER FIBRA NATURAL OU SINTÉTICA

FANAFEL

FÁBRICA NACIONAL DE FELTROS INDUSTRIAIS
SOCIEDADE LIMITADA

APART.: 9
TELEF.: 52091 PBX
TELEG.: FELTROS

OVAR
PORTUGAL

ESCRITÓRIO E FÁBRICA
ESTRADA DE S. JOÃO

Empresa Ultramarina de Sondagens e Fundações, L.da

(SONDADORA)

SONDAGENS geológicas e geotécnicas — CAPTAÇÕES de águas subterrâneas — REBAIXAMENTOS do nível freático — CONSOLIDAÇÕES E ESTABILIZAÇÃO do solo — INJECÇÕES DE CIMENTO e outros produtos — INFRAESTRUTURAS de barragens, túneis e pontes — FUNDAÇÕES de todos os tipos

Única Empresa da especialidade com sede no Ultramar Português

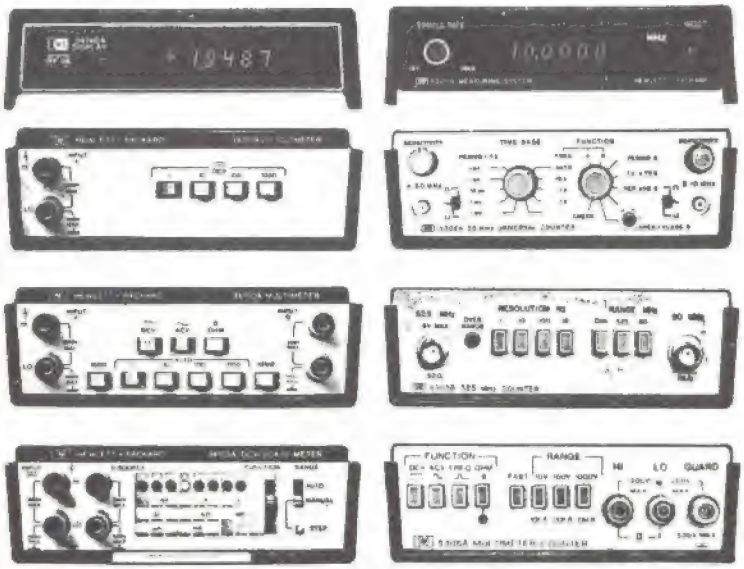
DELEGAÇÃO - LISBOA
Tr. do Guarda Mór, 13-r/c
Tel. 32 46 93 e 21 32 56

SEDE - LUANDA
R. Francisco Newton, 389/393
C. P. 2178 - Tel. 81 89 7

MOÇAMBIQUE
L. Marques - C. P. 982 - Tel. 74 11 21
Beira - C. P. 1002 - Tel. 7 14 97

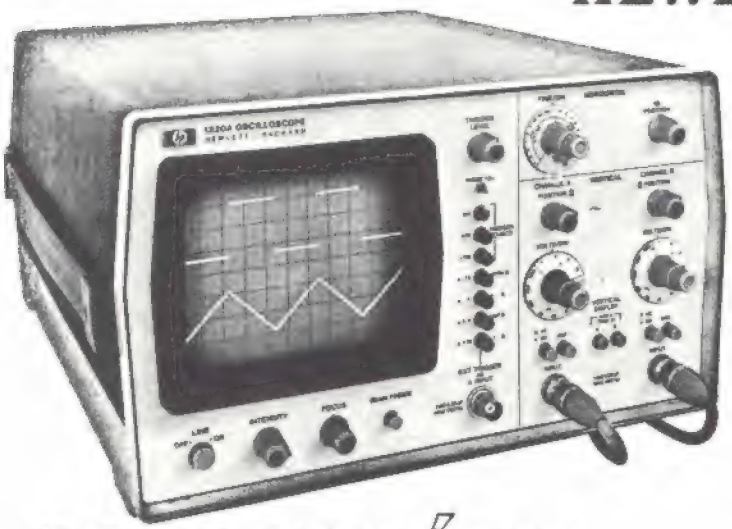
DIGITAIS

MULTÍMETROS · CONTADORES



3470 5300

HEWLETT hp PACKARD



T18

LABORATÓRIO DIGITAL

Mod. 5035T

OSCILOSCÓPIO 1220

EMPRESA TECNICA DE EQUIPAMENTOS ELÉCTRICOS, S.A.R.L.

R. Rodrigo da Fonseca, 103 · LISBOA
Telefones 68 60 72 · 3 · 4 · 5 · Telex 1598
R. José Falcão, 15-4° Dto. PORTO · Tel. 2 62 09 · 3 33 50

C. D. U. 539.56

INTRODUÇÃO À MECÂNICA DA FRACTURA

SALGADO PRATA
Eng. Mec. (I. S. T.), Ang. Sol. (ESSA), M. Wel. I

RESUMO

A mecânica da fractura relaciona as propriedades, defeitos de compacidade dos materiais e suas condições de aplicação como o fenómeno da fractura.

Neste trabalho apresentam-se conceitos e formulações analíticas básicos da mecânica da fractura.

ABSTRACT

The fracture mechanic relates the properties, the compacity faults of materials and its condition of aplication with the fracture phenomenon.

This work presents basic concepts and analytic formulations of the fracture mechanics.

1. TERMINOLOGIA BÁSICA E OBJECTIVO

Com o fim de minimizar ambiguidades considerou-se conveniente precisar o significado dos termos utilizados.

Utilizaremos a palavra *fractura* a propósito de casos em que a ruptura se dá essencialmente devido à propagação duma fenda, característica que as distingue dos outros casos em que a ruptura se dá essencialmente devido a excessiva deformação plástica.

Designaremos por *mecânica de fractura* a ciência que trata da quantificação dos factores que condicionam a extensão duma fenda em função das tensões e deformações. Ao aprofundar-se tal ciência depara-se rapidamente com a necessidade da utilização duma grandeza correspondente à resistência que o material opõe à extensão duma fenda, grandeza essa que designaremos por tenacidade à fractura ou simplesmente *tenacidade*.

A mecânica da fractura não se limita ao tratamento da extensão instável de fendas provocada simplesmente pelas forças exteriores, mas pode igualmente aplicar-se à extensão de fendas provocada por fadiga, corrosão sob a tensão, fluência, fragilização pelo hidrogénio ou por combinação de dois ou mais destes mecanismos.

A aplicação dos processos analíticos da mecânica da fractura ao projecto duma obra com o objectivo de garantir a segurança dos seus componentes contra a ruptura designa-se por *controle da fractura*. O control da fractura implica nomeadamente a especificação da tenacidade do material, dos processos de fabricação e dos defeitos admissíveis.

O controle da fractura propõe também indicar para cada elemento duma obra de material, dimensões e geometria definidas, quais os defeitos admissíveis para que o dito elemento resista a condições de serviço bem determinadas.

À luz da mecânica da fractura a determinação das dimensões dos defeitos é feita por via analítica entrando em conta com factores geométricos, com as tensões de serviço e seu tipo, e com parâmetros característicos do material nas condições de serviço e espessura presentes, nomeadamente com a tenacidade. A tenacidade passa assim a ser um parâmetro que se pode e deve utilizar no cálculo, logo na fase de projecto da obra, tal como por exemplo a tensão limite de elasticidade. Esta situação contrasta com a tradicional em que a tenacidade, ainda vvulgarmente expressa em resiliência Charpy, só pode ser utilizada duma forma empírica, por comparação com a de obras do mesmo tipo, material e condições de utilização que prestaram boas provas em serviço.

Compreende-se que a situação tradicional possa conduzir quer à falta de segurança quer à falta de economia quer á falta de segurança. À falta de economia pode surgir quando sendo a comparação atrás referida possível, se adoptaram critérios mais drásticos do que na realidade seria necessário. À falta de segurança pode surgir quando se trata de obras que impliquem uma combinação materiais-espessura-condições de serviço tais que o projectista não possua dados estatísticos sobre obras similares; é o que pode suceder quando se passa para materiais mais resistentes, ou para maiores espessuras, ou para utilização a mais baixas temperaturas, etc. Não é assim de admirar o interesse crescente que por toda a parte está despertando o estudo da mecânica da fractura. Para este interesse contribuiram também os problemas encontrados nos projectos aeroespaciais com os materiais de alta resistência e os inerentes à utilização de fortes espessuras nos componentes de centrais nucleares.

A mecânica da fractura conta já hoje com êxitos na aplicação quer a construção de materiais de elevada resistência e/ou forte espessura, quer a construções de

materiais e espessuras mais correntes como sejam reservatórios sob pressão construidos de aços ao C-Mn de média resistência.

Note-se que as dimensões dos defeitos admissíveis podem ser, consoante os casos, muito diversas, desde dezenas de centimetros até dimensões inferiores ao mínimo detectável pelas actuais técnicas de controle não destrutivo.

Neste último caso, correspondente a situações excepcionais, só o ensaio de sobrecarga poderá dar uma ideia da capacidade da construção resistir aos esforços; mas então a mecânica da fractura de nada serviu — para ser utilizada nestes casos excepcionais é necessário que se desenvolvam as técnicas de control não destrutivo.

2. CARACTERISTICAS GERAIS DAS FRACTURAS

O fenómeno da fractura pode processar-se por mecanismos de clivagem, quase-clivagem, coalescência de microcavidades, escorregamento e estricção, fadiga, corrosão sob tensão, fragilização pelo hidrogénio, fragilização devida ao contacto com outros metais líquidos, ou por combinação de dois ou mais destes mecanismos, que é de resto o caso mais frequente.

À escala macroscópica as superfícies resultantes da fractura, apresentam essencialmente três tipos distintos:

a) Plano — quando a superfície resultante da fractura é plana e normal à tensão que a originou;

b) inclinado — quando a superfície resultante da fractura forma um ângulo de cerca de 45° com direcção da tensão que a originou;

c) fibroso — quando a superfície resultante da fractura apresenta o aspecto de fibras, provenientes de estricção acentuada do material, orientadas segundo a direcção da tensão que as originou.

Mais frequentemente em vez destes tipos puros encontra-se o tipo mixto, correspondente à combinação daqueles.

O tipo da superfície depende dos mecanismos microscópicos de fractura intervenientes. Por sua vez factores macroscópicos determinam os mecanismos microscópicos. Assim por exemplo o aumento da espessura em provetes de aço pode fazer com que a fractura por clivagem predomine sobre a fractura por coalescência de microcavidades; o mesmo se passa quando, por exemplo em provetes de titânio, a acuidade do entalhe aumenta.

As fracturas planas podem ser geradas por quaisquer dos mecanismos citados. As fracturas inclinadas são quase sempre geradas pela coalescência de microcavidades à qual se segue a ruptura por escorregamento e estricção; todavia a ruptura também se pode consumar por fadiga ou por clivagem; este último caso sucede por exemplo em provetes de Cr e de grão fino que após estricção severa se rompem por clivagem escorvada em diversos pontos da secção reduzida por estricção.

As estruturas mais clássicas da mecânica da fractura não se baseiam nos mecanismos microscópicos de fractura citados mas sim num mecanismo macroscópico. Falar dum mecanismo macroscópico de fractura é aparentemente uma abstracção, visto que os defeitos macroscópicos são resultantes dos processos microscópicos implicados na fractura. Já a teoria da elasticidade assenta numa abstracção ao considerar os corpos elásticos como homogéneos e isótropos.

Segundo a mecânica da fractura mais clássica, uma fenda propaga-se quando os seus lábios ao afastarem-se criam, na região do fundo da fenda, concentrações de tensões e de extensões que o material é incapaz de suportar. Avalia-se assim a situação do material no fundo da fenda através das grandezas macroscópicas (tensões e extensões). Mas estas grandezas macroscópicas reflectem a situação microscópica. Compreende-se assim o êxito conseguido pela aplicação duma teoria baseada em hipóteses macroscópicas.

3. ESTADOS PLANOS DE TENSÕES E ESTADOS PLANOS DE EXTENSÕES

Na continuação referir-nos-emos a estados planos de tensões bem como a estados planos de extensões. É pois conveniente rever as características de cada um daqueles estados.

Reportar-nos-emos desde já ao caso que mais nos interessa isto é de chapas e a um sistema de eixos x, y, z, sendo o eixo dos zz normal à superfície da chapa.

Diz-se que se está em presença dum estado plano de tensões quando se verifica $\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{zy} = 0$

Este estado ocorre por exemplo quando se submete uma chapa muito fina a tensões uniformes de tracção orientadas segundo o plano da chapa. Na verdade qualquer «fatia» paralela às faces da chapa se pode considerar livre de tensões, nas suas superfícies normais ao eixo dos zz por estas se encontrarem muito próximas das faces da chapa que por hipóteses estão livres de tensões.

Diz-se que se está em presença dum estado plano de extensões quando se verifica $\varepsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{zy} = 0$

Este estado ocorre por exemplo na zona central duma chapa muito espessa submetida a tensões uniformes de tracção orientadas segundo o plano da chapa, ao passo que as zonas laterais, nas proximidades das superfícies da chapa, ficam sujeitas a um estado plano de tensões. Na verdade à variação da espessura da zona central opõem-se as zonas adjacentes; o mesmo não sucede com as zonas laterais às quais se aplicam raciocínios idênticos aos feitos sobre as chapas finas.

Em provetes prismáticos entalhados num ou em dois lados, pode encontrar-se, após fractura por aplicação de esforços de tracção uniformes e normais ao entalhe uma fractura do tipo mixto, plana na zona central do provete e inclinada nas zonas laterais. A forte triaxilidade existente na zona central impediu a actuação das tensões de corte dando-se a fractura porque a tensão

principal de tracção, normal ao plano do entalhe, ultrapassou um valor crítico; sob a acção desta tensão a fractura propaga-se segundo o plano do entalhe. Nas zonas laterais pelo contrário a reduzida triaxilidade permitiu a actuação das tensões de corte o que explica o tipo inclinado de fractura. Estamos pois em presença do caso já citado em que na zona central existe um estado plano de extensões e nas zonas laterais estados planos de tensões.

Sendo assim e supondo que o plano x z, coincide com o plano que contém o entalhe ter-se-á na zona central:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma z}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_x + \sigma_y) = 0$$

donde

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$$

No plano de entalhe tem-se pela teoria da elasticidade (válida para pontos situados fora da pequena zona plástica que se forma na extremidade do entalhe) $\sigma_x = \sigma_y$ de forma que as tensões principais são

$$\sigma_x$$
$$\sigma_y = \sigma_x$$
$$\sigma_z = 2\nu\sigma_x$$

4. ANÁLISE DAS TENSÕES E DAS DEFORMAÇÕES NA VIZINHANÇA DA EXTREMIDADE DUMA FENDA

A teoria da elasticidade permite estudar os campos de tensões e de deformações existentes na vizinhança da extremidade duma fenda. Assim Irwin demonstrou que em certas hipóteses de geometria e de solicitações as tensões existentes nas regiões das extremidade são, em condições elásticas, dadas pelas expressões

$$\sigma_x = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 - \operatorname{sen}\frac{\theta}{2}\operatorname{sen}\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos\frac{\theta}{2}\left[1 + \operatorname{sen}\frac{\theta}{2}\operatorname{sen}\frac{3\theta}{2}\right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \operatorname{sen}\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}$$

$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$ em estado plano de extensões

$\sigma_z = 0$ em estado plano de tensões

$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$

sendo r e θ as coordenadas polares e K_I um parâmetro denominado factor de intensidades de tensões.

Dum modo mais geral pode dizer-se que as tensões nas regiões das extremidades são dadas por expressões do tipo

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} f_{ij}(\theta)$$

e os deslocamentos são dados por

$$u_i = K_I \sqrt{\frac{r}{2\pi}}\,(gi)(\theta)$$

K_I depende da geometria, do tipo de solicitações e das propriedades elásticas do material. Todavia em certas hipóteses de solicitações K_I é independente das propriedades elásticas do material.

Note-se que K_I não depende do estado em causa ser um estado plano de tensões ou de extensões. Ainda não se deverá confundir K_I com um factor de concentrações de tensões pois ele depende destas.

5. EXTENSÃO DUMA FENDA EM SÓLIDOS FRÁGEIS

5.1 *Introdução*

Apresentar-se-ão a seguir diversos critérios de extensão de fendas em sólidos frágeis.

Quando se verificam as condições correspondentes ao critério aplicado, a fenda alonga-se isto é, sofre uma extensão.

A alteração da geometria resultante da extensão da fenda provoca directamente uma alteração das tensões reinantes nas regiões das extremidades. Há também uma alteração provocada indirectamente pela extensão da fenda. De facto a extensão da fenda permitindo um aumento das dimensões na direcção normal à fenda, pode provocar uma redução das solicitações correspondentes: é o que se passa por exemplo num ensaio em que é fixa a distância entre as garras da máquina, ou num recipiente contendo um fluido incompressível quando, em virtude da extensão da fenda, se dá um derramamento de fluido.

Por outro lado a própria tenacidade pode manter-se constante, mas também pode aumentar ou diminuir quando o comprimento da fenda aumenta. Uma das causas desta alteração reside no facto dos campos de tensões e extensões existentes nas regiões das extremidades da fenda variarem durante a extensão desta.

O que se disse já permite concluir que do facto de se verificarem as condições necessárias à extensão duma fenda não se pode concluir que se atinja a fractura. Os critérios de extensão apenas permitem concluir que esta se inicia, por isso são vulgarmente chamados critérios de iniciação.

O estudo das fases posteriores à extensão isto é a propagação, não será abordada neste trabalho, nem para sólidos frágeis nem para sólidos semi-dúcteis e dúcteis.

5.2 *Critério de Griffith*

Griffith demonstrou que uma fenda de secção recta elíptica achatada de comprimento 2 a, existente numa

placa infinita submetida a uma tensão uniforme σ normal ao plano da fenda, se propaga de forma brutal quando o valor da tensão aplicada atinge um valor crítico dado por

$$\sigma_c = \left(\frac{2}{\pi}\,\frac{E\gamma}{a}\right)^{1/2} \quad (1) \quad \text{em estado pleno de tensões}$$

ou por

$$\sigma_c = \left[\frac{2}{\pi\,(1-\nu^2)}\,\frac{E\gamma}{a}\right]^{1/2} \quad (2)$$

em estado plano de extensões

Na dedução destas expressões admitiu-se não haver deformação plástica nas extremidades da fenda, isto é considerarem-se corpos verdadeiramente frágeis. Além desta hipótese não realista a teoria de Griffith está sujeita a várias críticas que adiante se apontarão. Apesar disso a sua importância para o estudo dos sólidos frágeis é indiscutível. Por outro lado deu origem à mecânica da fractura

5.3 *Critério de Griffith — Orowan*

Reexaminando o critério de tensão de Griffith, Orowan demonstrou com hipóteses idênticas, mas supondo que o raio de curvatura nas extremidades da fenda é da mesma ordem que o raio atómico que a tensão crítica será dada por

$$\sigma_c = \left(\frac{E\gamma}{\pi a}\right)^{1/2} \quad (3) \quad \text{em estado pleno de tensões}$$

Mais importante porém é a contribuição dada por Orowan para a adaptação da teoria de Griffith aos metais. Nestes a deformação plástica nas extremidades da fenda é relativamente importante ao contrário do que sucede com os sólidos ditos frágeis. Segundo Orowan as expressões de Griffith serão mais correctas se em vez do parâmetro γ se considerar não só a energia superficial γ_s, mas também a energia necessária à deformação plástica γ_p (correspondente a um aumento unitário do comprimento da fenda) nas extremidades da fenda. Demonstra-se que quando o comprimento da fenda é macroscópico γ_p é muito elevado em relação γ_s. Sendo assim a tenacidade dum metal é sobretudo condicionada pela sua ductilidade.

Nos metais e em condições de comportamento frágil, γ_s e γ_p estão relacionados com a força de extensão da fenda G_{IC} por

$$G_{IC} = 2\,\gamma_s + \gamma_p \quad (4),$$

sendo G_{IC} definida como uma força fictícia que produza o trabalho correspondente às energias superficial e plástica necessárias à expansão unitária da fenda.

Ora nas expressões de Griffith e na similar de Orowan, aplicáveis aos sólidos ditos frágeis, o trabalho correspondente à expansão unitária da fenda intervém, através de γ, formalmente reduzido a metade. Então para considerar a contribuição do Orowan dever-se-á substituir nas expressões citadas γ por $G_{IC}/2$.

Então a primeira e a segunda expressão de Griffith poder-se-ão excrever respectivamente.

$$\sigma_c = \left(\frac{EG_{IC}}{\pi\,a}\right)^{1/2} \quad (5) \text{ em estado plano de tensões}$$

e

$$\sigma_c = \left[\frac{EG_{IC}}{\pi\,(1-\nu^2)\,a}\right]^{1/2}$$

(6) em estado plano de extensões

Para tensões σ inferiores à crítica define-se de forma análoga G por

$$\sigma = \left(\frac{E\,G_I}{\pi\,a}\right)^{1/2} \quad (7) \text{ em estado plano de tensões}$$

e

$$\sigma = \left[\frac{E\,G_I}{\pi\,(1-\nu^2)\,a}\right]^{1/2}$$

(8) em estado plano de extensões

Atendendo a (4) também se pode definir G_{IC} como sendo a energia, reduzida à unidade de espessura da placa, necessária ao aumento unitário do comprimento da fenda. No início da extensão da fenda tal energia é investida em trabalho de deformação plástica e em energia superficial.

5.4 *Critério da tenacidade crítica*

As tensões principais reinantes na região que envolve as extremidade duma fenda são função da intensidade de concentração de tensões. Assim para uma fenda elíptica de semi-comprimento a e raio de curvatura nas extremidades ρ, existente numa placa infinita submetida a tensões σ normais à direcção da fenda, demonstra-se que a tensão máxima $\sigma_{máx}$ é dada por

$$\sigma_{máx} = \sigma\left[1 + 2\left(\frac{a}{\rho}\right)^{1/2}\right] \text{ sendo } \left[1 + 2\left(\frac{a}{\rho}\right)^{1/2}\right] \text{ um}$$

factor de concentração de tensões. A expressão anterior leva à conclusão que para fendas muito estreitas, com $\rho \simeq 0$, $\sigma_{máx}$ seria infinito. Ora na realidade mesmo nos metais ditos frágeis dá-se antes da ruptura uma certa deformação plástca que torna finito o raio de curvatura das extremidades da fenda.

A tensão $\sigma_{máx}$ não poderá por consequência servir de critério de ruptura.

Talvez pudesse servir de critério a tensão máxima atinginda a uma certa distância da extremidade da fenda. Imediatamente se levanta o problema de definir esta distância.

É então mais lógico recorrer a um factor definidor do campo de tensões na extremidade da fenda. Recorre-se ao factor de intensidade de tensões K_I que como já se disse depende da geometria, da distribuição das forças aplicadas e do comportamento elástico do material.

O valor de K_I aumenta à medida que aumentam as tensões aplicadas. Ora quando estas tensões atingem um certo valor, que corresponde um valor de factor de intensidade de tensões que designaremos por K_{IC}, inicia-se a extensão da fenda.

Pode então dizer-se que a extensão da fenda se dará quando o factor de intensidade de tensões ultrapassar um valor crítico K_{IC}, dependente da geometria, da distribuição das forças aplicadas, do material e das condições de ensaio. K_{IC}, é pois uma medida da tenacidade do material nas condições de ensaio consideradas.

Note-se que considerando a mesma geometria e a mesma distriblição das forças aplicadas, por exemplo a distribuição uniforme, K_{IC} dependerá apenas do material e das condições de ensaio.

O valor de K_I pode também calcular-se pela passagem ao limite:

$$K_I = C \lim_{\rho \to o} \sigma \sqrt{\rho}$$

sendo C uma constante

O cálculo de K_I por este processo é geralmente difícil.

Para placas infinitas com uma fenda central, K_I está relacionado com a tensão aplicada uniforme σ e com o semi-comprimento da fenda por

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \qquad (10)$$

e o valor crítico por $K_{IC} = \sigma_c \sqrt{\pi a}$ (10 a)

Se as placas de largura finita W ter-se-á para K_I

$$K_I = \sigma \left[W \operatorname{tg} \left(\frac{\pi a}{W} \right) \right]^{1/2} \qquad (11)$$

e para o valor crítico

$$K_{IC} = \sigma_c \left[W \operatorname{tg} \left(\frac{\pi a}{W} \right) \right]^{1/2} \qquad (11\ a)$$

Atendendo às expressões (7), (10) e às expressões (5), (10 a) obtém-se respectivamente

$$K^2_I = EG_I \qquad (12)$$

$$K^2_{IC} = EG_{IC} \qquad (12\ a)$$

ambas em estado plano de tensões. Para o estado plano de extensões obter-se-á de modo análogo à custa das expressões (8), (10) e (6), (10 a)

$$K^2 = \frac{E}{1 - \nu^2} G_I \qquad (13)$$

$$K^2_{IC} = \frac{E}{1 - \nu^2} G_{Ic} \qquad (13\ a)$$

Tal como foi definido, G_{Ic} é também uma medida da tenacidade do material, dependendo da geometria, do material e das condições de ensaio.

6. EXTENSÃO DUMA FENDA EM SÓLIDOS SEMI-DÚCTEIS E DÚCTEIS (*)

6.1 *Análise e Irwin*

Irwin utiliza um modelo que apesar de bastante aproximado no que se refere às dimensões da zona plástica, é muito importante na prática para a determinação de K_{Ic}.

As tensões normais a uma fenda achatada de comprimento 2 a, existente numa placa infinita submetida a tensões uniformes σ de tracção, normais ao plano da fenda são segundo Irwin, quando se considera que o campo de tensões existentes na placa é puramente elástico e em estado plano de extensões:

$$\sigma_y = \frac{\sigma x}{\sqrt{x^2 - a^2}} \quad x > a \qquad (14)$$

Esta expressão pode escrever-se com suficiente aproximação sob a forma

$$\sigma_y = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} = \sqrt{\frac{EG}{2\pi r}} \quad r << a \qquad (15)$$

sendo r a distância à extremidade e G um parâmetro relacionado com a intensidade de tensões nas regiões vizinhas das extremidades da fenda. G tem significado análogo a G_I mas por se referir a sólidos semi-dúcteis ou dúcteis que em geral não conduzem a fractura plana, omitiu-se o índice I.

Os deslocamentos das superfícies das fendas são dadas por

(*) Neste trabalho designam-se por sólidos semi-dúcteis aqueles em que no início da extensão da fenda, as zonas vizinhas das extremidades daquela se encontram em deformação plástica, embora zonas mais afastadas se encontrem em deformação elástica. Designam-se por sólidos dúcteis aqueles em que no início da extensão da fenda se encontram na totalidade em deformação plástica.

$$\eta = \frac{2\sigma}{E}\sqrt{a^2 - x^2} \qquad x < a \tag{16}$$

ou de forma aproximada por

$$\eta = \frac{2\sigma}{E}\sqrt{2ar} = 2\sqrt{\frac{2Gr}{\pi E}} \qquad r << a \tag{17}$$

sendo agora r medido no sentido oposto, isto é para o interior da fenda.

As tensões σ_y estão representadas na fig. 1. Mas as tensões para $x = a$ são infinitas o que é impossível. Então Irwin, considerando um material elasto-plástico puro, admite que dentro da zona de largura R (fig. 2) a tensão não ultrapassa a tensão limite de elasticidade σ_e. Admite ainda que fora daquela zona as tensões são as correspondentes à distribuição elástica relativa à fenda aumentada de r_y. Atendendo a que a distribuição de tensões no plano da fenda deverá equilibrar a tensão aplicada, demonstra-se que $R = 2\ r_y$. A distribuição de tensões resultante (fig. 2) é pois a correspondente a uma fenda fictícia de semi-comprimento $a + r_y$, truncada no valor $\sigma_y = \sigma_e$. A dimensão da zona plástica será segundo (15):

$$r_y = \frac{EG}{2\pi\sigma_e^2} \tag{18}$$

6.2 *Desenvolvimento de Wells*

Desenvolvendo a análise de Irwin, Wells deduziu expressões para o deslocamento da abertura da fenda (crack open displacement — C. O. D.) δ nas extremidades, desta para o caso de sólidos semi-dúcteis.

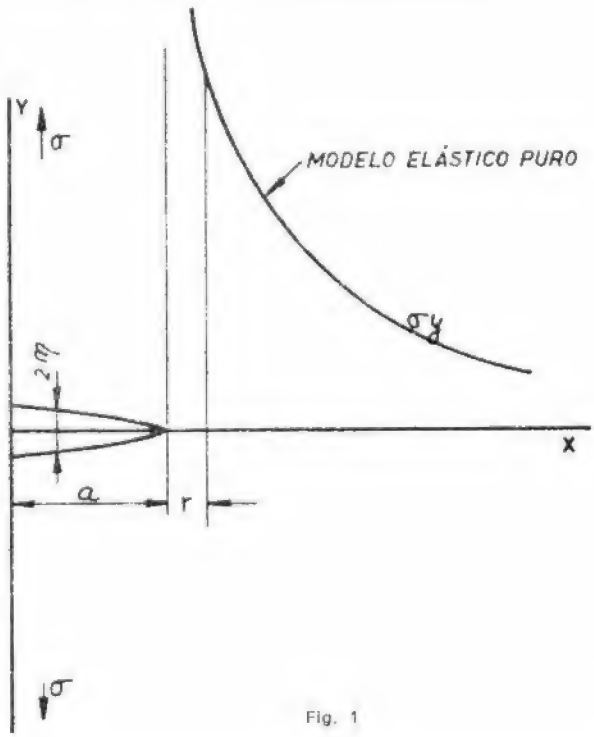


Fig. 1

A fenda fictícia suporta, à distância r_y das extremidades, e devido à deformação plástica, um deslocamento (aumento) da abertura cujo valor é $\delta = 2\eta_y$.

Por outro lado as expressões (15) e (17) podem aplicar-se à fenda fictícia desde que se faça $r = r_y$, se substitua a por $a_1 = a + r_y$ e se faça $G = G_c$ sendo G_c a «força de extensão da fenda» capaz de provocar a sua extensão, mas condições consideradas. Então substituindo em (17) o valor de r_y tirado de (15) obtém-se, utilizando as primeiras e as segundas igualdades daquelas expressões, respectivamente:

$$\delta = 2\ \eta_y = \frac{4\sigma^2\ a_1}{E\sigma_e} = \frac{4\ G_c}{\pi\sigma_e} \tag{19}$$

Esta expressão pode ser escrita sob a forma

$$G_c = \frac{\pi}{4}\sigma_e\,\delta$$

Se consideramos o que se passa desde o início de actuação das forças aplicadas, diremos que se criam nas extremidades da fenda zonas plásticas que aumentam progressivamente assim como o deslocamento da abertura da fenda. Mas este último não pode aumentar indefinidamente dado que o material tem uma capacidade de deformação plástica limitada. Dada a forma como se definiu G_c, o valor de δ dado por (19) corresponde precisamente ao limite isto é ao valor crítico a partir do qual a fenda se expande.

Dentro da zona plástica a energia necessária à extensão da fenda engloba a que é absorvida pela deformação plástica e a necessária à criação da superfície da fenda (energia superficial). Então por um balanço energético qualitativo pode escrever-se

$$G_c \geqslant \sigma_e\ \delta \tag{19 a}$$

A expressão (19 a) é mais geral e por isso preferível a (19) visto que esta última se refere às condições elasto-plásticos particulares.

A partir de (18) e (19 a) pode escrever-se

$$r_y > \frac{\delta\ E}{2\ \pi\ \sigma_e} = \frac{\delta}{2\ \pi\ \varepsilon_e} \tag{20}$$

O valor de $\frac{a}{r_y}$ pode calcular-se a partir de (20) e a partir de (15), considerando a forma que esta última expressão assume quando aplicada à fenda fictícia obtendo-se respectivamente

$$\frac{a}{r_y} = \frac{2\pi\varepsilon_e\ a}{\delta} = 2\left(\frac{\sigma_e}{\sigma}\right)^2 - 1 \qquad \sigma < \sigma_e \tag{21}$$

De (21) conclui-se que os semi-comprimentos da fenda e da zona plástica serão iguais quando $\sigma = \sigma_e$ isto é no início da deformação plástica generalizada. Todavia é natural pôr em dúvida que (21) se aplique à deformação plástica generalizada.

Wells considera que à temperatura de transicção, do estado plano de tensões para o estado plano de extensões, o valor crítico do C. O. D. é dado por

$$\delta_o = 2 \pi \varepsilon_e t \qquad (22)$$

sendo t a espessura do material. Por outro lado demonstrou experimentalmente que quando a temperatura é tal que a iniciação da ruptura frágil (*) se dá após, ou

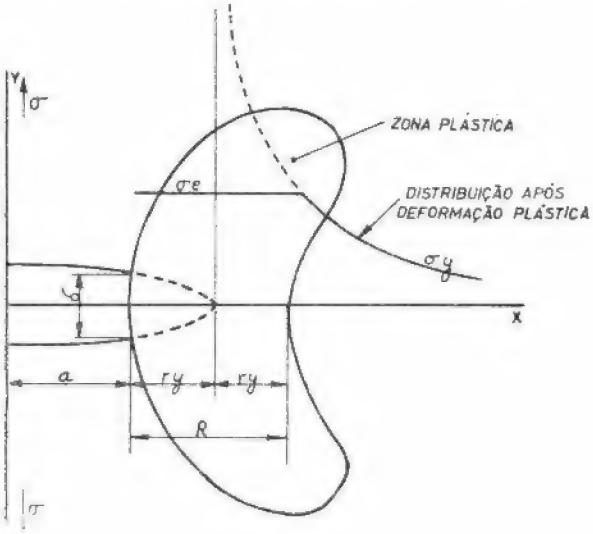


Fig. 2

imediatamente antes da cedência generalizada, o valor de δ correspondente é constante para uma gama extensa de valores do comprimento da fenda, quer o ensaio seja feito sobre placas largas com uma fenda central quer sobre provetes de dobragem com uma fenda lateral. Esta constatação não discorda da expressão (22) e demonstra que deve haver alguma relação entre δ_o e as características do material provavelmente, como sugere Wells, entre δ_o, ε_e e t.

Wells verificou também por via experimental que para temperaturas inferiores à de transicção, correspondente a uma mudança do estado plano de tensões para o estado plano de extensões:

a) As dimensões das zonas plásticas existentes nas extremiades da fenda tornam-se inferiores à espessura da placa.

b) Os valores do COD correspondentes à fractura reduzem-se à medida que a temperatura baixa.

NOTA 1

Tal como a G_{IC} está associado K_{IC}, a G_C está associado a um factor de intensidade de tensões que designaremos por K_C.

Ao passo que K_{IC} se aplica a estados planos de extensões, K_C aplica-se a estados planos de tensões.

O factor de intensidade de tensões dum dado material varia em função da espessura tal como se indica na fig. 3.

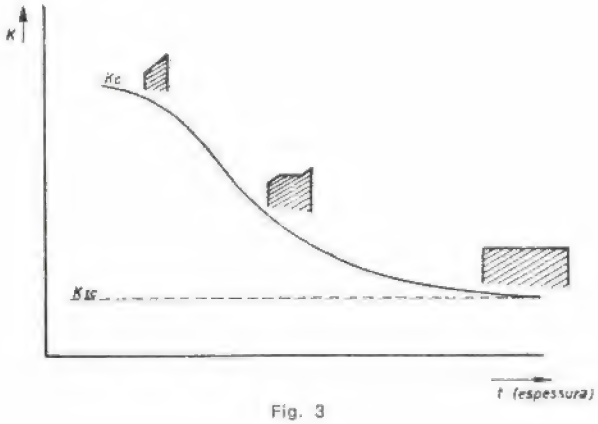


Fig. 3

Verifica-se que para valores elevados da espessura, aos quais correspondem estados planos de extensões e fracturas planas, o factor de intensidade de tensões se torna constante, sendo assim uma característica do material. Nestas condições é designado por K_{IC}

À medida que a espessura diminui o factor de intensidade de tensões aumenta atingindo os maiores valores para as menores espessuras correspondentes a estados planos de tensões. Nestas condições corresponde a K_C. O valor K_C é uma característica dum produto.

O tipo de fractura respectiva é inclinado; para espessura intermédias, o tipo de superfície resultante da fractura é mixto.

NOTA 2

O factor K_{IC} aplica-se a casos em que a extensão da fenda se dá em condições ditas frágeis para as quais, as dimensões das zonas plásticas existentes nas extremidades da fenda, são diminutas. Ora a dimensão da zona plástica é, como as expressões (12 a) e (18) deixam antever, proporcional a $\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$. Por consequência K_{IC} será aplicável quando a espessura t do material for suficientemente superior a $\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$: verifica-se ser suficiente que $t > 2{,}5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e}\right)^2$, sendo então a fractura frágil. Se t for inferior mas pouco ao valor fornecido pela desigualdade anterior a fractura será semi-dúctil; se for bastante inferior será dúctil.

(*) A expressão «ruptura frágil» está aplicada aqui no sentido macroscópico, significando que a deformação plástica medida sobre comprimentos de referência da ordem de grandeza dos habituais é diminuta.

6.3 *Teoria de Barenblatt*

A teoria de Griffith apresenta limitações algumas das quais se apresentam a seguir.

a) As deformações na extremidade duma fenda saem fora do domínio da elasticidade. Em virtude da deformação, a elipse por hipótese de raio quase nulo nas extremidades, passa a ter um raio finito.

b) O ângulo interno formado pelas faces da fenda nas extremidades passa de 0° no início para 180° depois da aplicação das forças exteriores Assim nas regiões que englobam as extremidades da fenda, as partículas vizinhas afastam-se muito e dever-se-á considerar o comportamento atómico em vez do comportamento dos meios contínuos.

c) No cálculo da redução da energia elástica que se verifica quando da extensão da fenda, admite-se que não existem tensões aplicadas na superfície da fenda mas por outro lado, admite-se que esta superfície possui energia superficial. Ora a existência de energia superficial e portanto de tensão superficial numa superfície curva, implica a existência de tensões normais à superfície que equilibrem a tensão superficial.

d) A teoria de Griffith considera uma elipse que no limite dá uma fenda. Não demonstra que se obteriam resultados análogos a partir da passagem ao limite de outro tipo de descontinuidade.

Na teoria cujos postulados e conclusões gerais se exporá imediatamente a seguir, considerar-se-á indistintamente a forma inicial que lhe foi dada por Barenblatt assim como aperfeiçoamentos posteriores.

Os resultados obtêm-se pela sobreposição das soluções dos três problemas de elasticidade seguintes:

a) Placa sem fenda, e simplesmente sujeita às forças exteriores.

b) A mesma placa, sem forças exteriores, mas com fenda, cujas superfícies se encontram sujeitas a uma distribuição de forças iguais e opostas às que nos locais correspondentes criam as forças exteriores na hipótese a).

c) A mesma placa, sem forças exteriores, com fenda cujas superfícies se encontram sujeitas às forças de coesão.

As forças de coesão (ou de atracção atómica ou molecular), actuando nas extremidades da fenda, tendem a comprimir entre si as superfícies desta. Consideradas só por si (hipótese c) induzem singularidades na distribuição das tensões de compressão que criam nas extremidades da fenda, ao passo que as forças aplicadas, actuando só por si, induzem singularidades na distribuição das tensões de tracção que criam nas mesmas zonas. O primeiro postulado em que se baseia esta teoria diz que pela sobreposição daquelas distribuições de tensões se obtém uma outra não singular. Não havendo singularidades na distribuição das tensões também não as haverá nos deslocamentos relativos das superfícies da fenda que unirão suavemente constituindo um perfil em forma de ponta de lança como se indica na fig. 4.

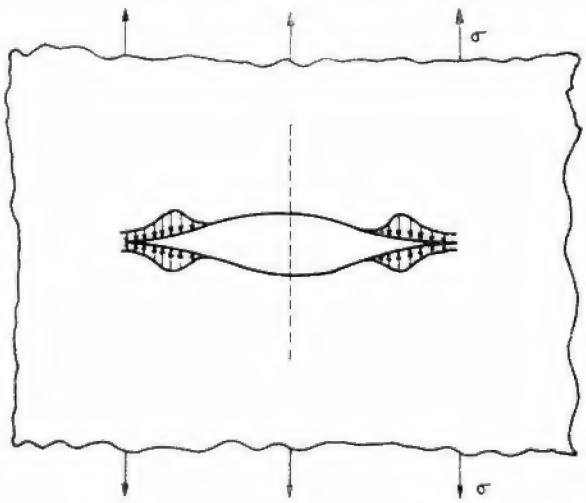


Fig. 4

Não há vantagem nesta teoria em considerar que as forças aplicadas estão uniformemente distribuidas visto se considerar que a distribuição das tensões de coesão nas extremidades da fenda não é uniforme. Considera-se pois que as tensões aplicadas têm uma distribuição mais genérica e impõe-se apenas que ela seja simétrica relativamente ao plano da fenda e ao eixo normal àquela e que passa pela zona média.

O segundo postulado em que se baseia a presente teoria afirma que as forças de coesão se fazem sentir em pequenas zonas a partir das extremidades da fenda e para o interior desta.

O terceiro e último postulado diz que «a forma da secção normal da superfície da fenda (em expansão) na região das extremidades (e consequentemente a respectiva distribuição local de forças de coesão na superfície da fenda) não depende das forças aplicadas e é sempre a mesma para um dado material em condições definidas (temperatura, composição e pressão da atmosfera envolvente, etc)».

Segundo esta teoria as forças de coesão começam por aumentar à medida que aumentam as forças aplicadas até que chegada uma dada altura não conseguem mais suportar os efeitos daquelas e a fenda expande-se. Mas durante a expansão a distribuição das forças de coesão nas extremidades da fenda mantém todas as suas características assim como a forma da secção normal da superfície da fenda nas mesmas zonas — em

ponta de lança. Nestas circunstâncias diz-se que a fenda se encontra em equilíbrio móvel. Pelo menos no início da extensão da fenda não se trata pois duma extensão brutal, isto é, rápida mas sim que se dá à medida que aumentam as forças aplicadas.

As bases expostas permitem calcular as forças aplicadas capazes de provocar a extensão da fenda a partir do conhecimento das forças de coesão, traduzidas por uma constante do material chamada módulo de coesão. Permitem igualmente calcular os deslocamentos relativos das superfícies da fenda, e por consequência a forma desta em cada instante, correspondente a uma dada distribuição das forças aplicadas (até a fenda entrar em expansão pois a partir daí a forma das suas extremidades é, como já se disse, independente das forças aplicadas).

Note-se que o terceiro postulado, com a introdução das forças de coesão distribuídas ao longo de pequenos comprimentos nas extremidades da fenda, suplementa o modelo contínuo da teoria da elasticidade.

Torna assim possível estabelecer algumas relações com os pequenos comprimentos intrínsecos aos modelos das redes, isto é com os espaços atómicos ou moleculares.

O limite que o terceiro postulado impõe às forças coesivas torna ainda possível estabelecer uma relação com a resistência teórica do material.

6.4 *Algumas reflexões sobre a teoria de Barenblatt*

Analisando a forma assumida pela extremidades duma fenda que se expande de acordo com a teoria de Barenblatt, verificamos que no limite interior da zona onde se exercem forças de coesão, as partículas se encontram sensivelmente mais afastadas do que o normal. Todavia tal afastamento não é tão grande que as forças de atracção se deixem de fazer sentir. Quer dizer que o afastamento das partículas é microscópico pelo menos numa parte da zona da fenda (a parte exterior) onde se fazem sentir as forças de coesão.

Então o perfil da superfície da fenda apresentado na fig. 4 deverá ser considerado como o perfil definido pelas partículas situadas dum e do outro lado do plano central da fenda. Sendo assim a fenda apresentar-se-á, quando vista à escala macroscópica, com um comprimento inferior ao correspondente à fig. 4, e com um deslocamento finito nas extremidades (macroscópicas). As zonas compreendidas entre as extremidades da fenda vista à escala microscópica e as da fenda vista à escala microscópica (representada na fig. 4) encontrar-se-ão deformadas em parte elástica e em parte plasticamente.

O terceiro postulado exigindo a constância (para um dado material em condiçes definidas) da distribuição das forças de coesão que correspondem à extensão da fenda, implica a constância do deslocamento correspondente das extremidades (macroscópicas) da fenda desde o início da sua extensão. Conclui-se pois que a fenda expandir-se-á quando aquele deslocamento δ atingir determinado valor crítico,constant e para um dado material em condições definidas. Esta conclusão concorda com o que já se disse a propósito do desenvolvimento de Wells.

Ainda o facto, verificado experimentalmente por Wells, do deslocamento da abertura correspondente à iniciação da ruptura ser, quando esta se dá após ou imediatamente antes da cedência generalizada, largamente independente do comprimento da fenda, concorda com o terceiro postulado.

6.5 *Critério para a extensão duma fenda num metal semi-dúctil*

Numa placa dum metal semi-dúctil, contendo uma fenda e submetida a tensões de tracção normais à fenda formam-se, como já se disse, nas extremidades desta zonas plásticas, a partir de valores relativamente baixos das tensões aplicadas. Ensaios efectuados em condições tais que as fendas se mantêm em equilíbrio estático (portanto com comprimento constante) demonstram que as dimensões das zonas plásticas aumentam à medida que aumenta a intensidade das forças aplicadas. Constata-se também experimentalmente que a forma das zonas plásticas é diferente consoante a fenda se encontra em equilíbrio estático ou em equilíbrio dinâmico (em expansão). Ainda se verificou em aços que as zonas plásticas de fendas em equilíbrio estático têm a forma de secção recta da chama duma vela.

Em certos aços e plásticos a questão tem sido reduzida a termos mais simples. Assim em placas de certos aços contendo fendas em equilíbrio estático Dugdale constatou que as zonas plásticas são como que o prolongamento da fenda (fig. 5).

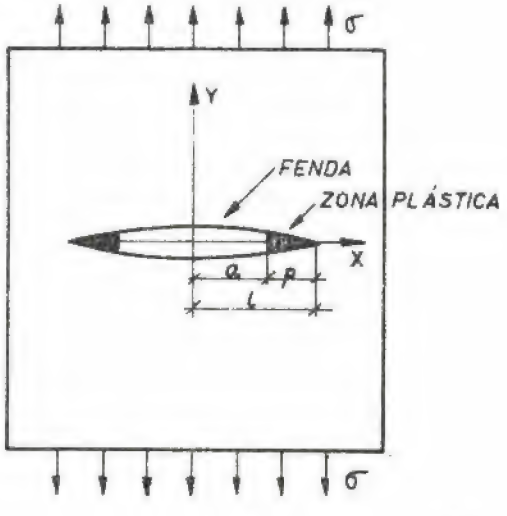


Fig. 5

Esta constatação concorda com as constatações feitas sobre a teoria de Barenblatt. Dugdale formulou as seguintes hipóteses:

a) Na zona plástica o material está submetido à tensão de cedência σ

b) Aforma e dimensões da zona plástica é tal que o material em regime elástico pode consirar-se limitado internamente por uma elipse achatada de comprimento 2 $(a + \rho)$.

c) O comprimento da zona plástica é tal que não exxistem singularidades de tensões nas extremidades da zona plástica.

Por outro lado é de supor que a extensão da fenda comece quando a capacidade de deformação plástica nas suas extremidades fique esgotada. À capacidade de deformação plástica máxima corresponderá um valor δ (crítico) do deslocamento da abertura da fenda.

A partir destas premissas é possível deduzir, tal como fizeram Goodier e Field, que δ está relacionado com as características do material, com o semi-comprimento da fenda e com as tensões aplicadas pela seguinte expressão

$$\delta = \frac{8\sigma_e a}{\pi E} \log \sec \left(\frac{\pi\sigma}{2\sigma_e} \right)$$

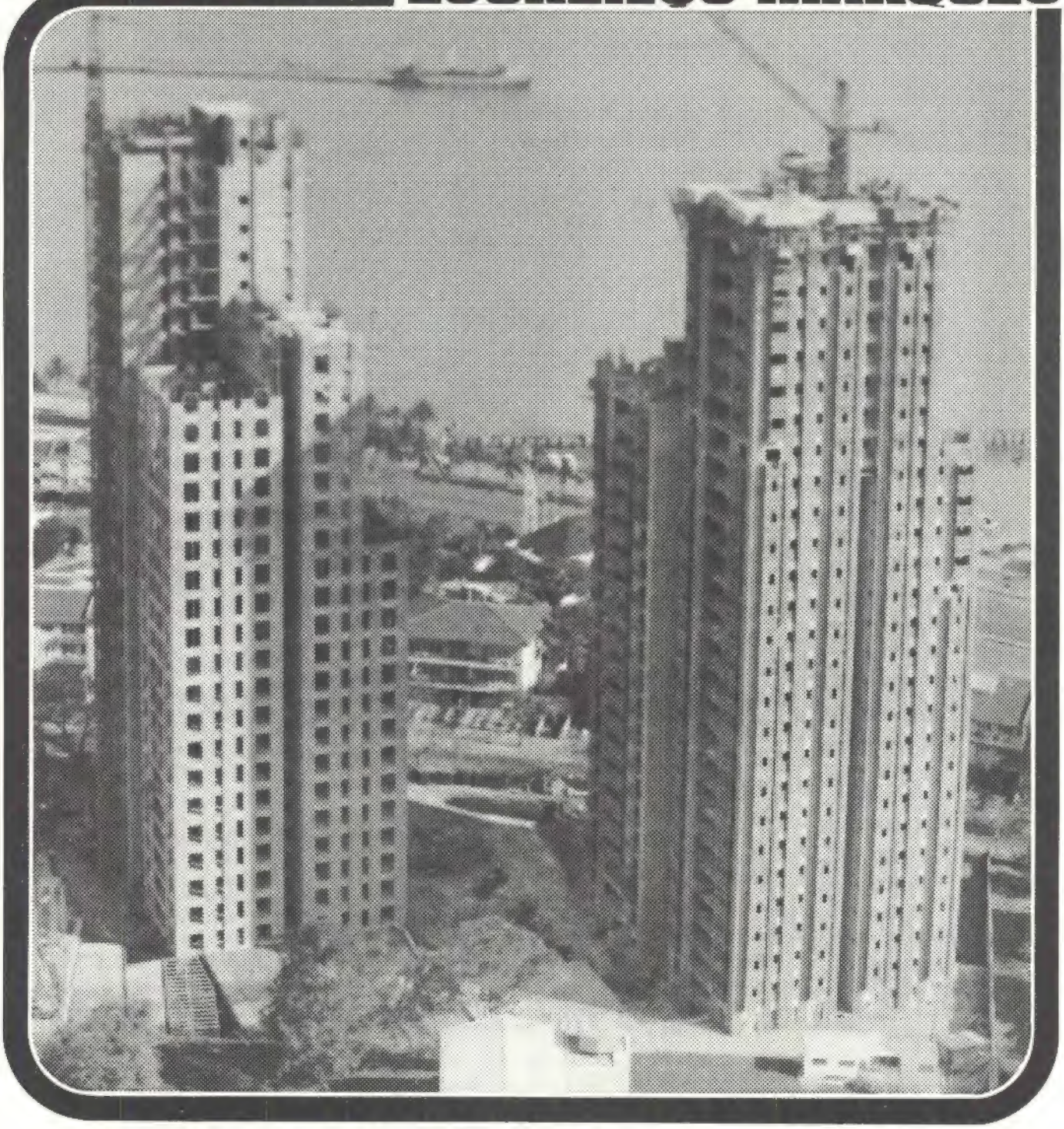
Desta expressão, já comprovada experimentalmente em vários casos, conclui-se que quanto menor for a ductilidade local, de que δ é uma medida, menor será a tensão σ necessária à extensão da fenda. Por consequência a extensão da fenda pode dar-se sob a acção de baixas tensões aplicadas quando a capacidade local de deformação plástica for reduzida, por exemplo por encruamento, envelhecimento, abaixamento da temperatura, aumento da velocidade de aplicação das forças exteriores.

Feiras, Conferências, Exposições e Congressos

OBJECTIVOS E PROGRAMA	LOCAL, DATA, ORGANIZAÇÃO E INFORMAÇÕES
Foire International de Machines et Materiaux d'Embales	Düsseldorf 9 a 15 — Maio - 75 Interpack 75
Exposição Internacional de CON IX Congresso Mundial de Minéria	Düsseldorf 22 al 29 Mayo - 76 Minéria 76
Colloque sur l'emplor de rayumnents de haute intensite por le traitements des déchets	Munich 17 - 21 Mais - 75 Rep. Féd. d'Allemagne
Feria Internacional de Plásticos + Caucho	Düsseldorf 7 - 14 Outubre - 75 Rep. Fed. d'Allemagne
1.° Congresso Nacional de Mecânica Aplicada	Lisboa, última semana de Dezembro L. N. E. C.
World Congress ou Finite Element Methods in Structural Mechanics	Bomnemouth, Dorset, England 12 th - 17 th October - 75 at the Royal Bath Hotel

TORRES VERMELHAS

LOURENÇO MARQUES



27 PISOS · 85 METROS DE ALTURA
DOIS DOS MAIS ALTOS EDIFÍCIOS DE PORTUGAL
Execução total com moldes deslizantes

PERFEIÇÃO TÉCNICA • RAPIDEZ DE EXECUÇÃO

CONSTRUÇÕES TÉCNICAS, S.A.R.L.

- **VARIADORES HIDRO-ESTATICOS DE VELOCIDADE INFINITAMENTE VARIAVEL** até 40 HP à velocidade máxima na saida, relação máxima 27:1 com operação manual, eletrica, hidraulica ou pneumatica
- **VARIADORES MECANICOS** até 75 HP - relações desde 2:1 até 16:1

monte a transmissão completa utilizando

OS PRODUTOS

RENOLD

PARA A TRANSMISSÃO DE FORÇA

* ou transmissão à corrente, corrente transportadora, redutor, luva de acoplamento, embreagem, freio etc.

Informações técnicas sobre a linha completa de produtos RENOLD na:

RENOLD LIMITED
SALES DIVISION
MANCHESTER ENGLAND

RENOLD HOLROYD Crofts CARTER

HARKER SUMNER & CIA LDA.
38 Rua de Ceuta, 48 PORTO
Apartado No. 162. Tél: 27054 (4 linhas)

14 Largo do Corpo Santo, 18 LISBOA-2
Tél: 324823, 35124.

C. D. U. 621.392.1:621.396.029.1

ANALYSIS OF FADE DURATIONS ON DIFFERENT MICROWAVE PATHS

JOSÉ A. C. SARAIVA MENDES
Engenheiro Electrotécnico (IST)

RESUMO

Este trabalho expõe a análise feita em três feixes hertzianos de microondas. Essa análise conduziu à obtenção de distribuições log-normais, relacionando a duração dos fenómenos individuais de fading com o seu número e com o tempo total de fading. Os resultados são depois comparados com algumas recomendações do CCIR.

SYNOPSIS

This paper reports the analysis of fade durations on three different microwave paths. We have obtained some log-normal distributions when relating the duration of single events to their number and to the total time of fading. The results are compared with some CCIR recommendations.

1. INTRODUCTION

This paper is concerned with the analysis of fades observed in propagation experiments carried out over three paths in Italy. With such analysis we try to determine the log-normal distributions of single events, defining its dependence on path characteristics (length and frequency).

The paths here after analysed have already been studied by P. Quarta (1), [2], [3] who gave the yearly cumulative distributions of fading for all of them. The equipment used for the propagation tests allowed the measurement of fade durations higher than 7.5 s, with an error ± 3 dB.

2. PATH CHARACTERISTICS

The three paths analysed have the following main characteristics: and their profiles are shown on fig. 1, 2 and 3.

TABLE I

Path	*Type*	*Frequency (MHz)*	*Length (km)*
Beigua-Milano	Over land	2000	126
Cimone-Milano	Over land	6000	189
Naples-Capri	Over sea	6000	31.5

3. DATA ANALYSIS

All the results shown in this paper correspond to measurements carried out during the summer. The analysis corresponds to the following total durations of observations:

— 923 hours for the path Beigua Milano
— 227 hours for the path Naples - Capri
— 216 hours for the path Cimone - Milano

The path Beigua - Milano (2000 MHz) has been observed during a longer period for it had slower variation of the received field, as we may conclude from fig. 4, where we show a typical recording of the fading for each path. The evolution of the fading of the path

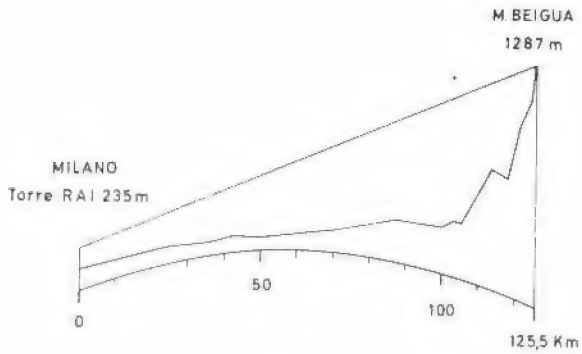


Fig. 1

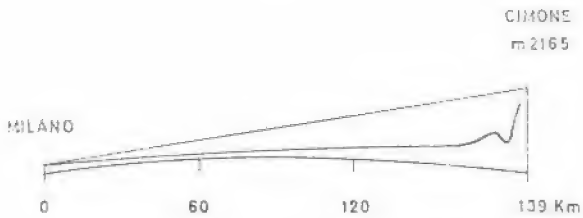


Fig. 2

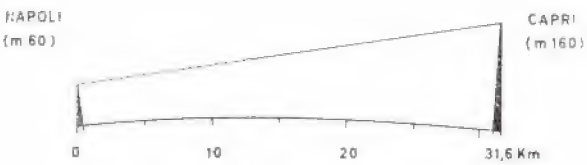


Fig. 3

Naples - Capri (6000 MHz) is faster than for the path Cimone - Milano, (6000 MHz) for it is an over sea path.

On fig. 5 we show the daily distribution of fading for the path Beigua-Milano. For the other two paths we have not made the same distribution as the influence of the daily period, was not so marked. The distribution of single events has been studied measuring their durations at 5 - 10 - 15 - 20 - 25 - 30 dB bellow the value of free space propagation. If t is the duration of single events at a given level l of attenuation and p_l its density of probability, it is possible to write:

$$\log p_l = f\ (p_l)$$

p_l may be defined as follows:

a) $\dfrac{\textit{Number of single events with duration } t_l}{\text{Total number of single events at level 1}}$

b) $\dfrac{\textit{Total duration of all single events at level 1}}{\text{Total time of fading at level 1}}$

If:

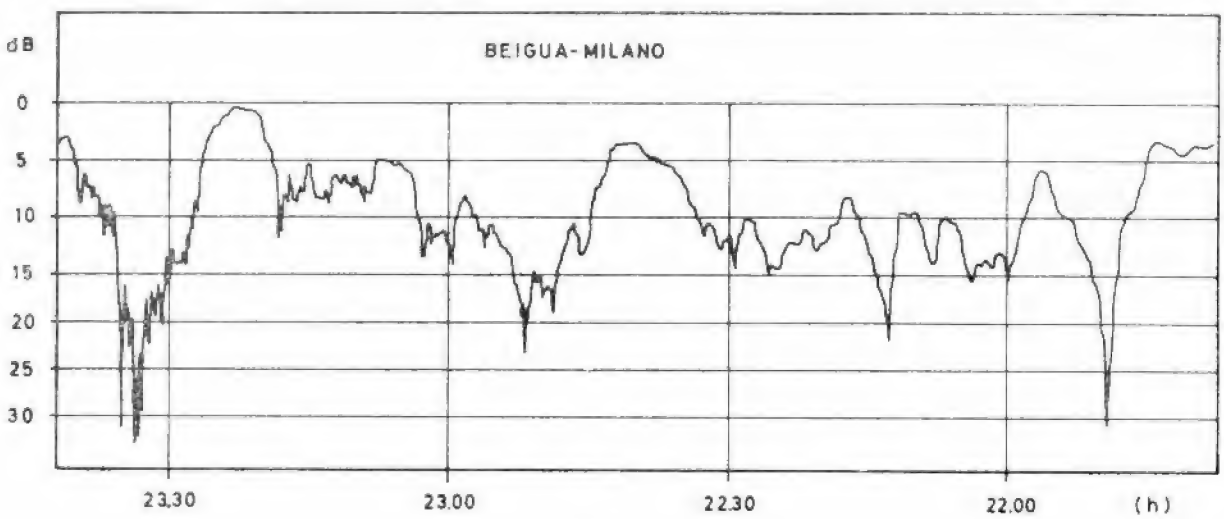
n_1 — number of single events with duration t_1
n_2 — number of single events with duration t_2
u_m — number of single events with duration t_m

We shall have accordingly to a)

$$P1a = \frac{n1}{n_1 + n_2 + \ldots + n_m}$$

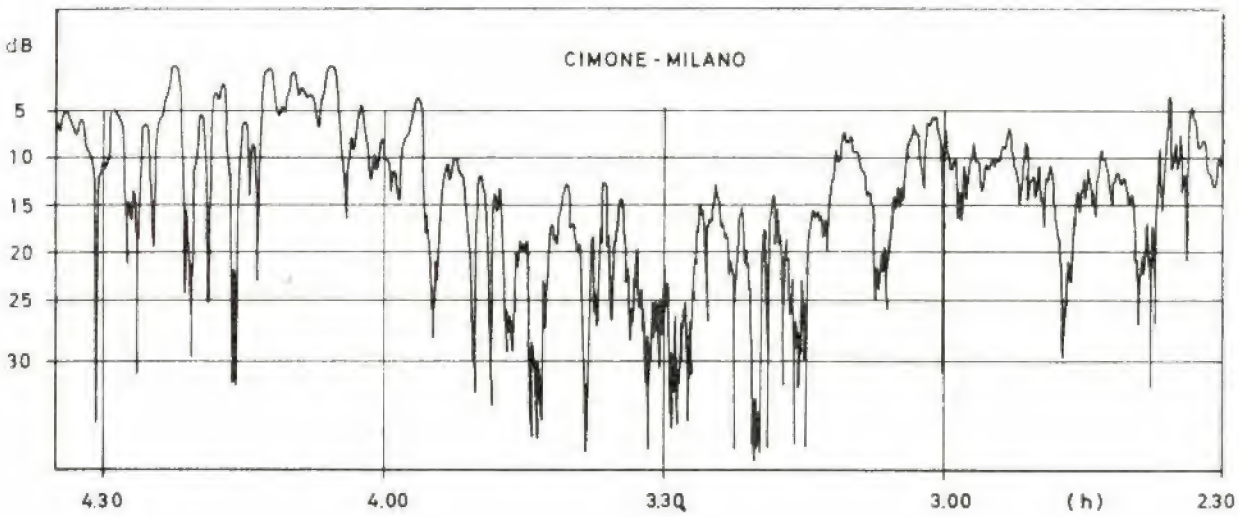
$$P2a = \frac{n_2}{n_1 + n_2 + \ldots + n_m}$$

$$Pma = \frac{n_m}{n_1 + n_2 + \ldots + n_m}$$



(a)

Fig. 4



(b)

Fig. 5

and accordingly to b)

$$P1b = \frac{n_1 \; t_1}{n_1 \; t_1 + n_2 \; t_2 + \ldots + n_m \; t_m}$$

$$P2b = \frac{n_2 \; t_2}{n_1 \; t_1 + n_2 \; t_2 + \ldots + n_m \; t_m}$$

$$Pmb = \frac{n_m \; t_m}{n_1 \; t_1 + n_2 \; t_2 + \ldots + n_m \; t_m}$$

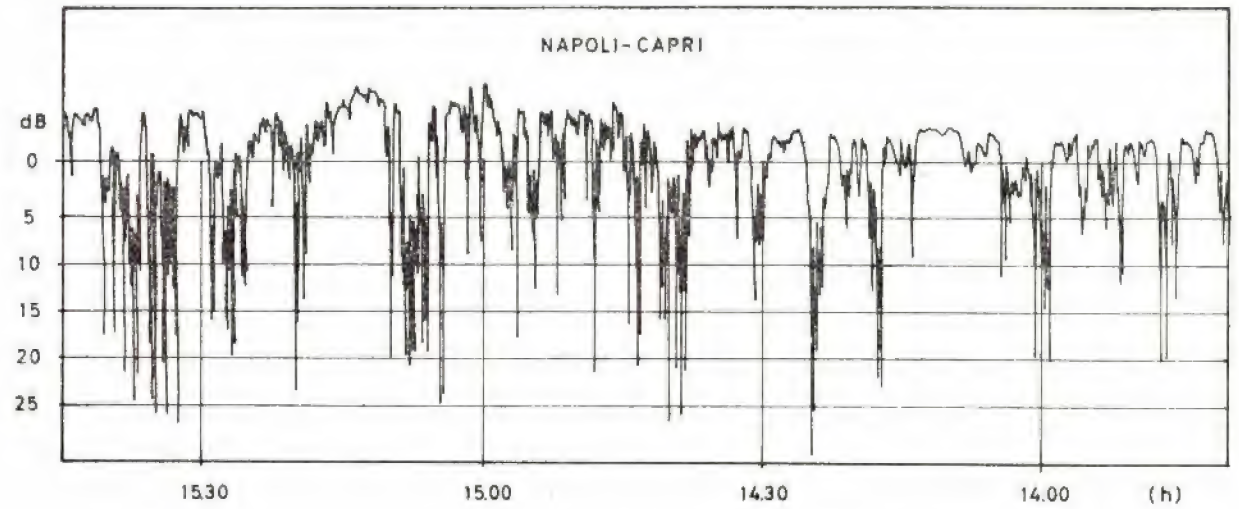
The distributions shown on fig. 6, 7 and 8 correspond to the integration of the density of probability defined in a). On the other hand fig. 9, 10 and 11 show the distributions of the integration of he density of probability defined in b). Both the definitions lead to log-normal distributions, allthough with a higher disperson for the definition b).

These disributions are quite a good help for the study of a linkbut they must be referred either to a total number of events or to a total time of fading.

The total time of fading can be determined by using the Rayleigh type distributions. The determination of the total number of events is more difficult although it corresponds to the best distribution.

On the following figures, we show some laws which try to give a more complete description of fading, in order to find out some relations, making easier the use of the distributions of fig. 6 - 11.

On fig. 12 we have ploted the average duration of fades at diferent levels, which has a logarithmic evolution. It is interesting to notice that the plots for the three paths are paralell lines.



(c)

Fig. 6

On the same fig. 12 we show the results proposed by the CCIR [4], for the average duration of fades at 30 dB and 40 dB on a path 40 km long and at 4000 MHz.

Besides, the CCIR [4] proposes a law of variation of the average duration of fades with path characteristics which does not agree with the results that we have found for the analysed paths. (vide § 4).

On fig. 13 we show the analysis we have done concerning the number of events at different levels of attenuation. In the figure we plot the depth of fading against the number of events in percentage to the 5 dB events. The so obtained curve also follows a logarithmic law, for the considered levels of attenuation except for the over-sea path Naples - Capri.

On the same figure, we also plot the results obtained by Barsis et alt [5].

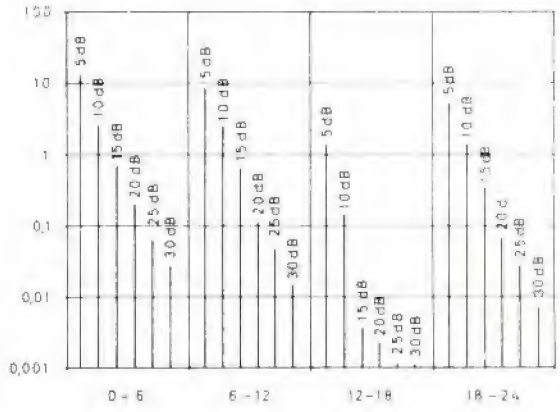


Fig. 7

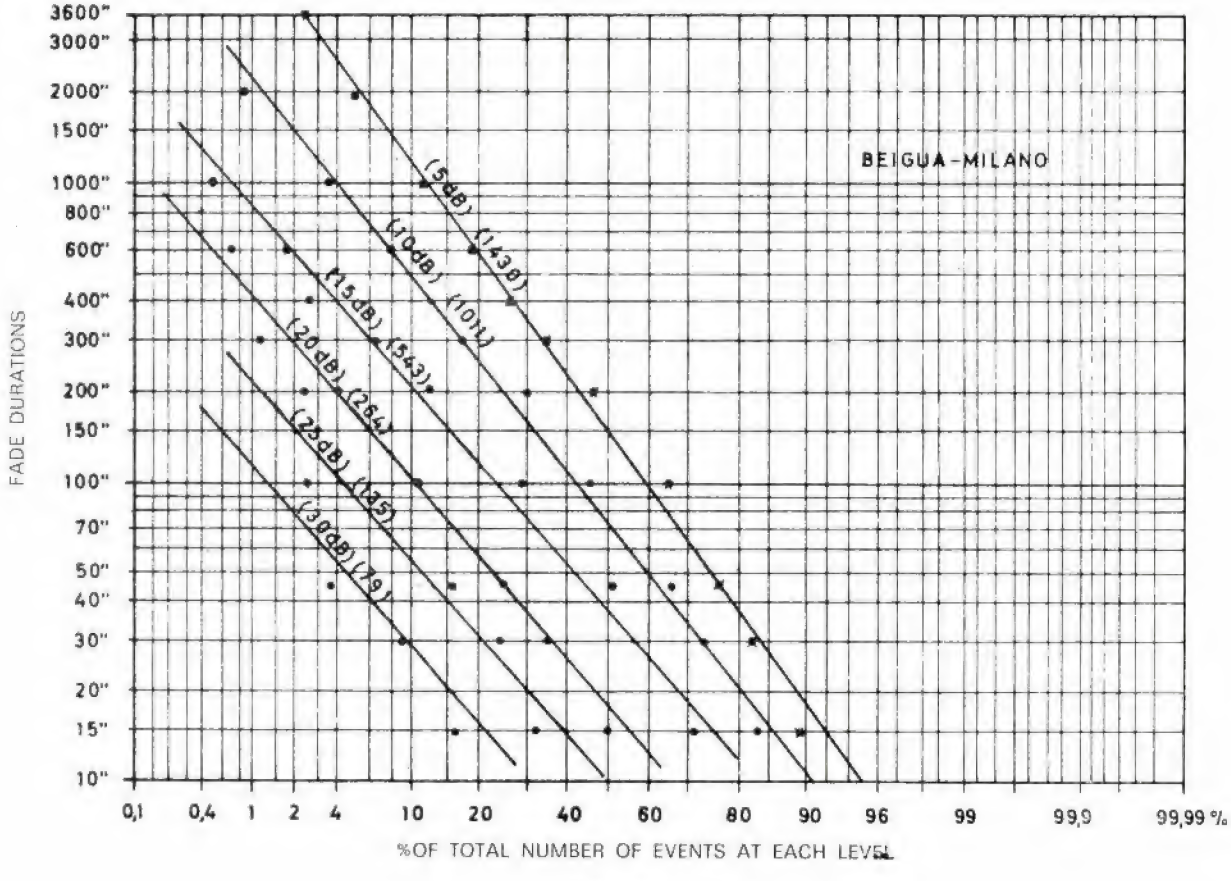


Fig. 8

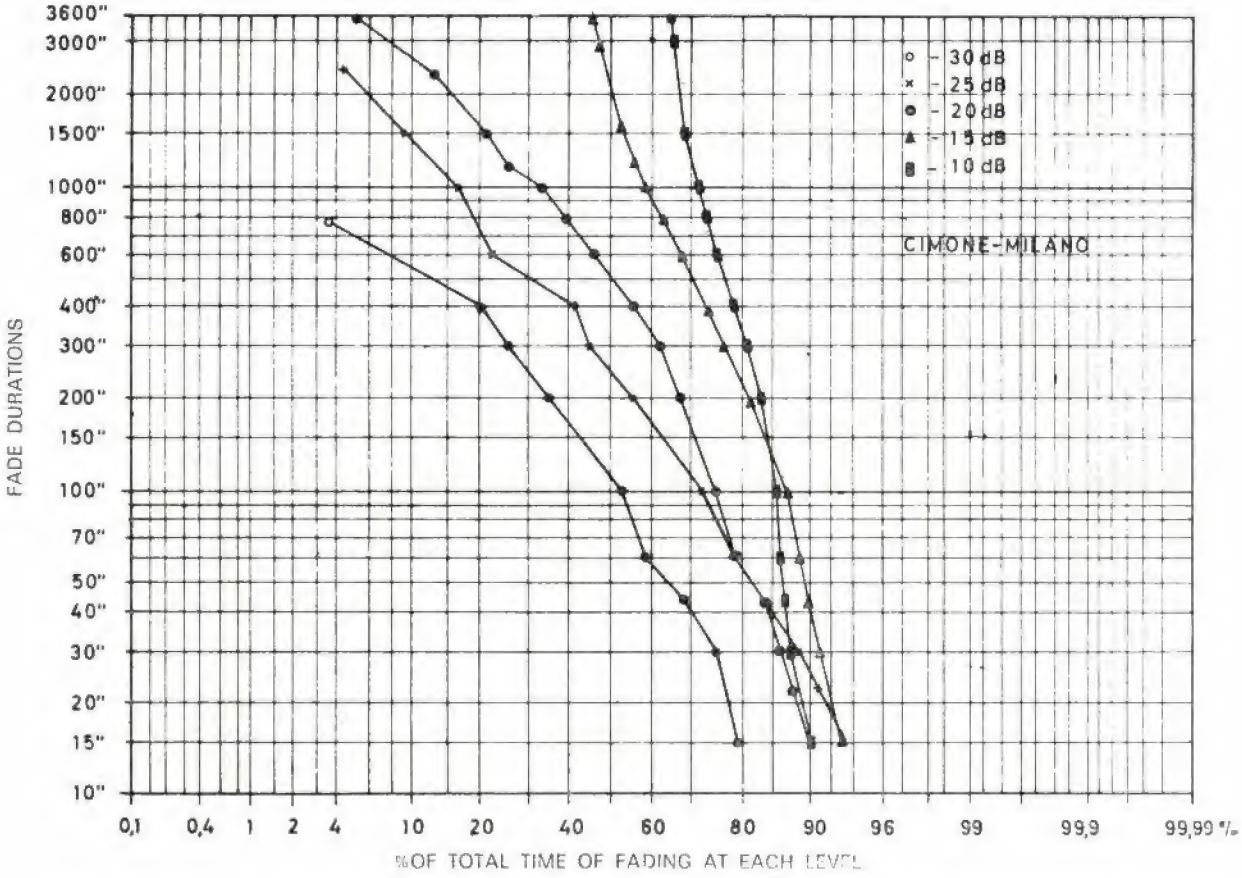

FADE DURATIONS
3600"
3000"
2000"
1500"
1000"
800"
600"
400"
300"
200"
150"
100"
70"
50"
40"
30"
20"
15"
10"
0,1
0,4
1
2
4
10
20
40
60
80
90
96
99
99,9
99,99 %
- 30 dB
- 25 dB
- 20 dB
- 15 dB
- 10 dB
CIMONE-MILANO
%OF TOTAL TIME OF FADING AT EACH LEVEL

Fig. 9

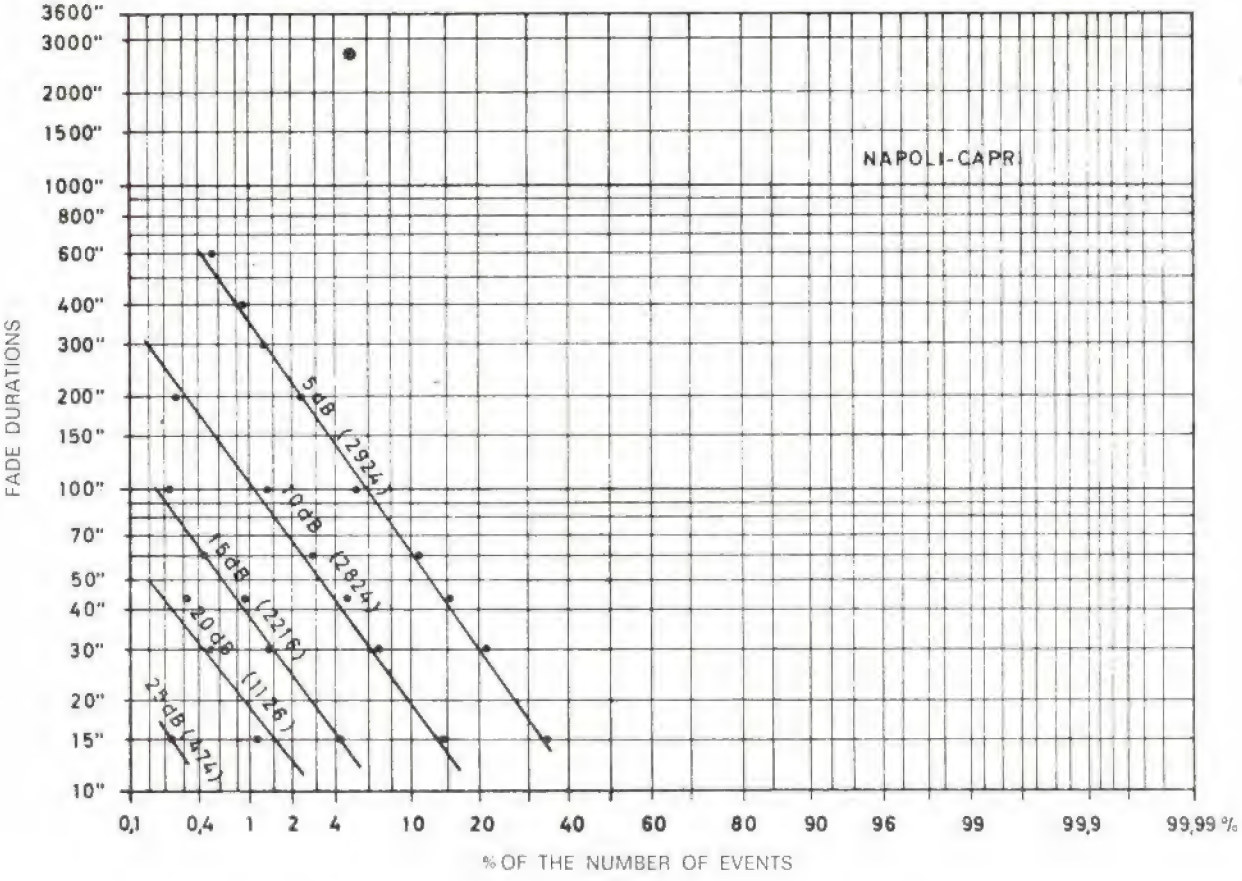

FADE DURATIONS
3600"
3000"
2000"
1500"
1000"
800"
600"
400"
300"
200"
150"
100"
70"
50"
40"
30"
20"
15"
10"
0,1
0,4
1
2
4
10
20
40
60
80
90
96
99
99,9
99,99 %
NAPOLI-CAPRI
5dB (2934)
10dB (2824)
15dB (2218)
20dB (1126)
25dB (474)
% OF THE NUMBER OF EVENTS

Fig. 10

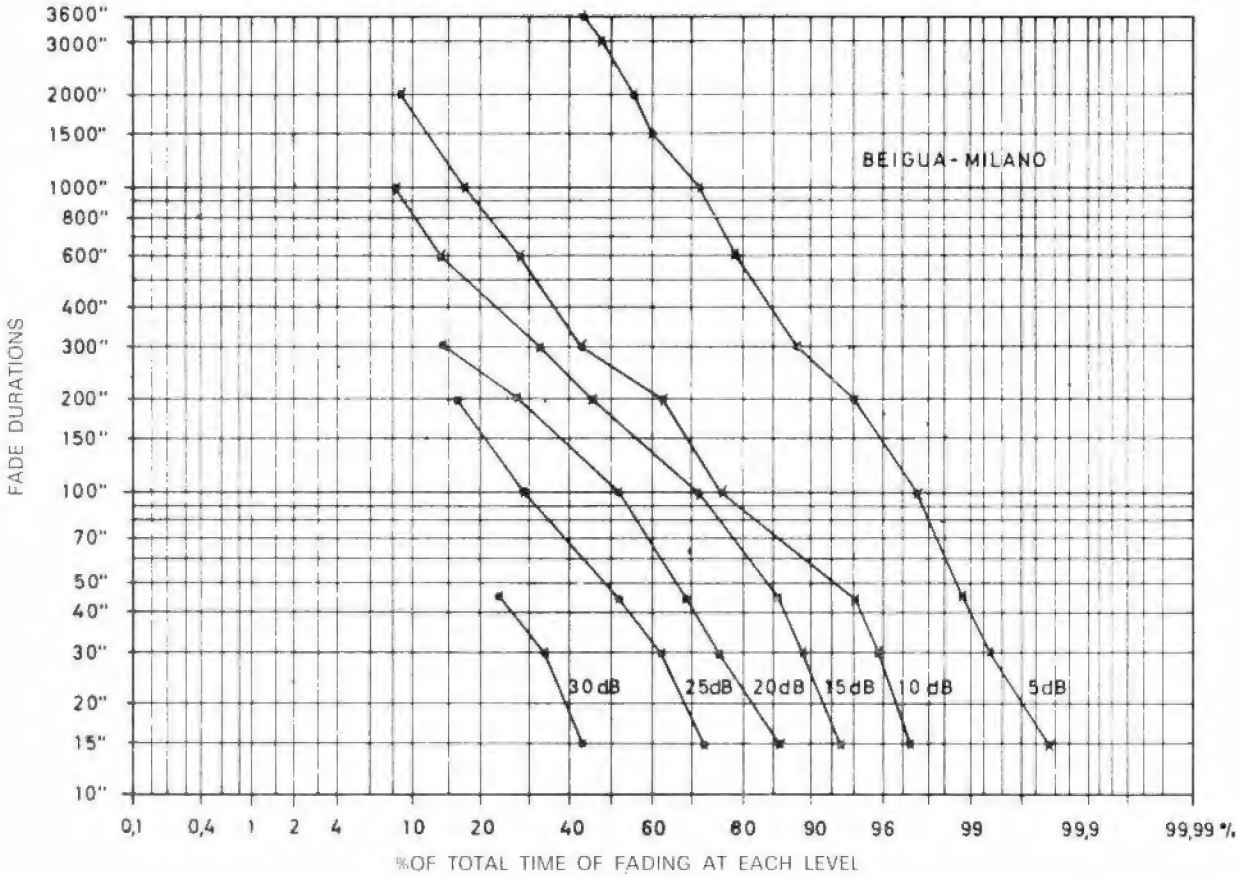

BEIGUA-MILANO
30dB
25dB
20dB
15dB
10dB
5dB
FADE DURATIONS
%OF TOTAL TIME OF FADING AT EACH LEVEL

Fig. 11

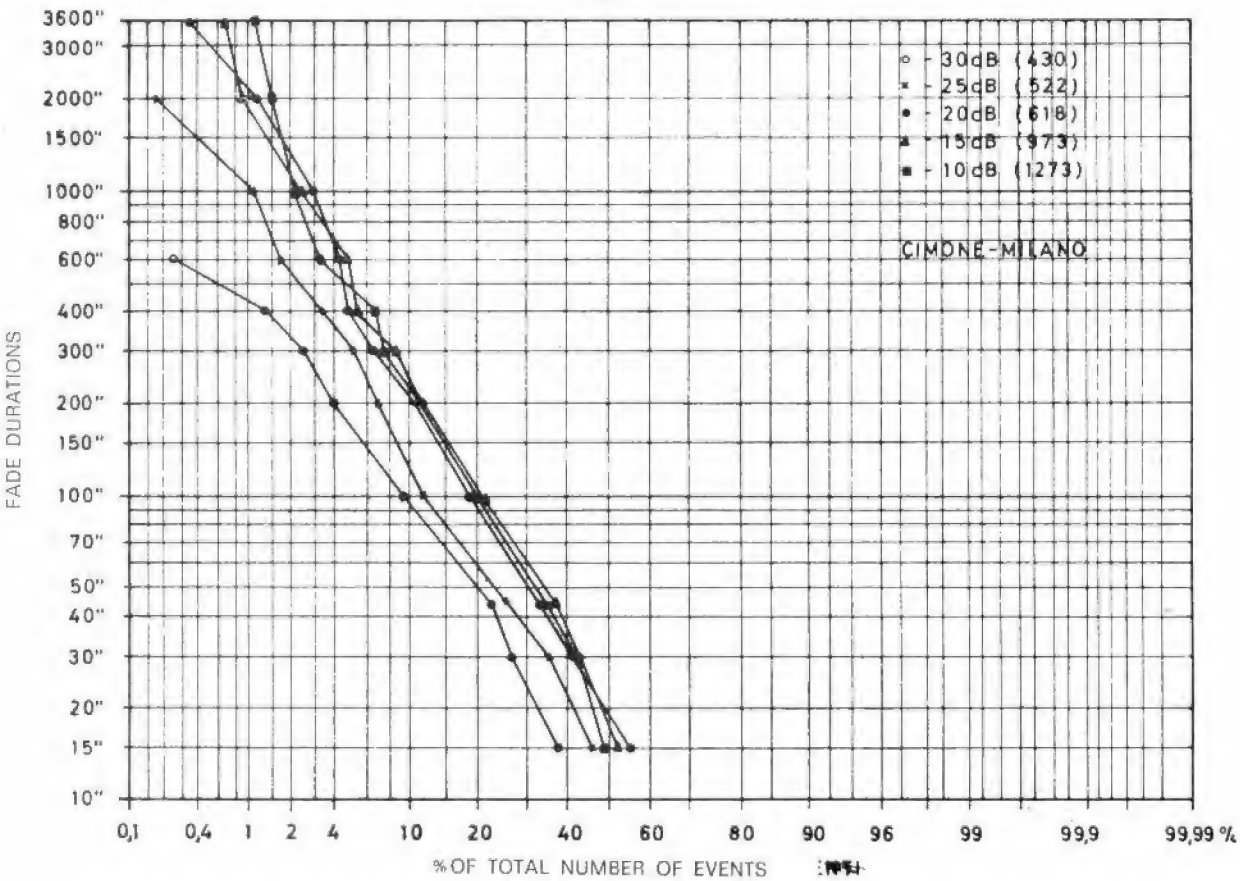

30dB (430)
25dB (522)
20dB (618)
15dB (973)
10dB (1273)
CIMONE-MILANO
FADE DURATIONS
%OF TOTAL NUMBER OF EVENTS

Fig. 12

4. INFLUENCE OF FREQUENCY, LENGTH AND TYPE OF PATH ON THE DISTRIBUTIONS OBTAINED

According to the CCIR [4] the standard deviation of the log normal distributions of single events does not depend substantally on frequency and it is given approximately by $\log_{10} 2.7$. Besides and according to the same document the duration of fades is approximately inversely proportional to the length of the paths. Such duration is of the order of 4 to 5 seconds for 40 dB fades and of the order of 7 to 9 seconds for 30 dB fades, allways for 40 km paths at 4000 MHz.

As the paths we have analysed are neither 40 km long nor at 4000 MHz, we can only use both relations proposed by the CCIR together, extrapolating the results for our paths and comparing them with experimental ones ,as follows:

TABLE II

Path	*f (MHz)*	*L (km*	*Average duration at 30 dB (s)*	
	4000MHz	*40 km*	*Calculated*	*Measured*
Cimone - Milano	1.5	4.71	1 ÷ 1.27	27
Beigna - Milano	0.5	3.15	4.45 ÷ 5.7	22
Naples - Capri	1.5	0.79	3.7 ÷ 4.7	1.8

We can see that the results we have obtained are very different of those proposed by the CCIR [4] except for the over-sea path Naples - Capri. However the results shown for the path Naples - Capri, is not a measured one. In fact the equipment did not allow us the measurements of fade durations 7.5S. So the value at 30 dB has been calculated assuming that the yearly cumulative distribution of fading is a Raylegh-type distribution, for attenuation levels below 20 dB.

Considering fig. 12 it seems that the average duration of fades depends more on the path length than on frequency. This result would agree with another document of the CCIR [7] although it concerns total durations and not the duration of single events.

On fig. 14 we show the influence of path length on the duration of fades, for the studied paths. It is interesting to notice that according to the result of fig. 14 there would be no fading for very short paths. This has been confirmed through measurements carried out at 11 GHz by P. Quarta et alt [8], [9] and [10], who have only found supplemental attenuation due to rain over two paths 10 and 20 kms long.

From the results of fig. 13 it seems that for the overland paths studied in [5] and for the overland paths Cimone - Milano and Beigua - Milano, there is an influence of path length on the number of events. In fact for the limited number of paths analysed the number of events increases with path length.

Regarding the standard deviation of the distributions of fig. 6 - 11, we cannot confirm its agreement with the CCIR as it reports values up to 40 dB while we have measured a maximum of 30 dB.

Nevertheless, as the distributions we have obtained have a regular spacement, we may assume that the evolution of the distribution for 40 dB is paralell to that for 30 dB, with a spacement between them of the same order of the spacement obtained between lower levels. In this case, the standard deviation here obtained would be similar to the value proposed by the CCIR, for the two overland paths, and lower than that value for the path Naples - Capri.

b) *Influence of the type of path*

As we have not found quoted in the literature any result concerning the influence of the type of the path on the duration of fades, and as the analysed results do not allow us to find acceptable relations, we only have verified the empirical formula:

$$P_R = (K \times Q) \left(\frac{f}{4} \right)^{1.2} d^{3.3}$$

Where

P_R = probablity of deep fades for small percentages of time

$K = 5.1 \times 10^{9}$

$Q = 0.4$ (over mountain)

$= 1.0$ (over plain)

$= \frac{72}{\bar{h}} \times \frac{1}{2}$, $\bar{h} = \frac{h_1 + h_2}{2}$ (over sea or coast)

f = frequency

d = path length (km)

This formula has been proposed by H. Makino e K. Morita [11], and reported also by the CCIR [12]. Considering that deep fades are those in the order of 40 dB, there is a good agreement between measured and calculated values.

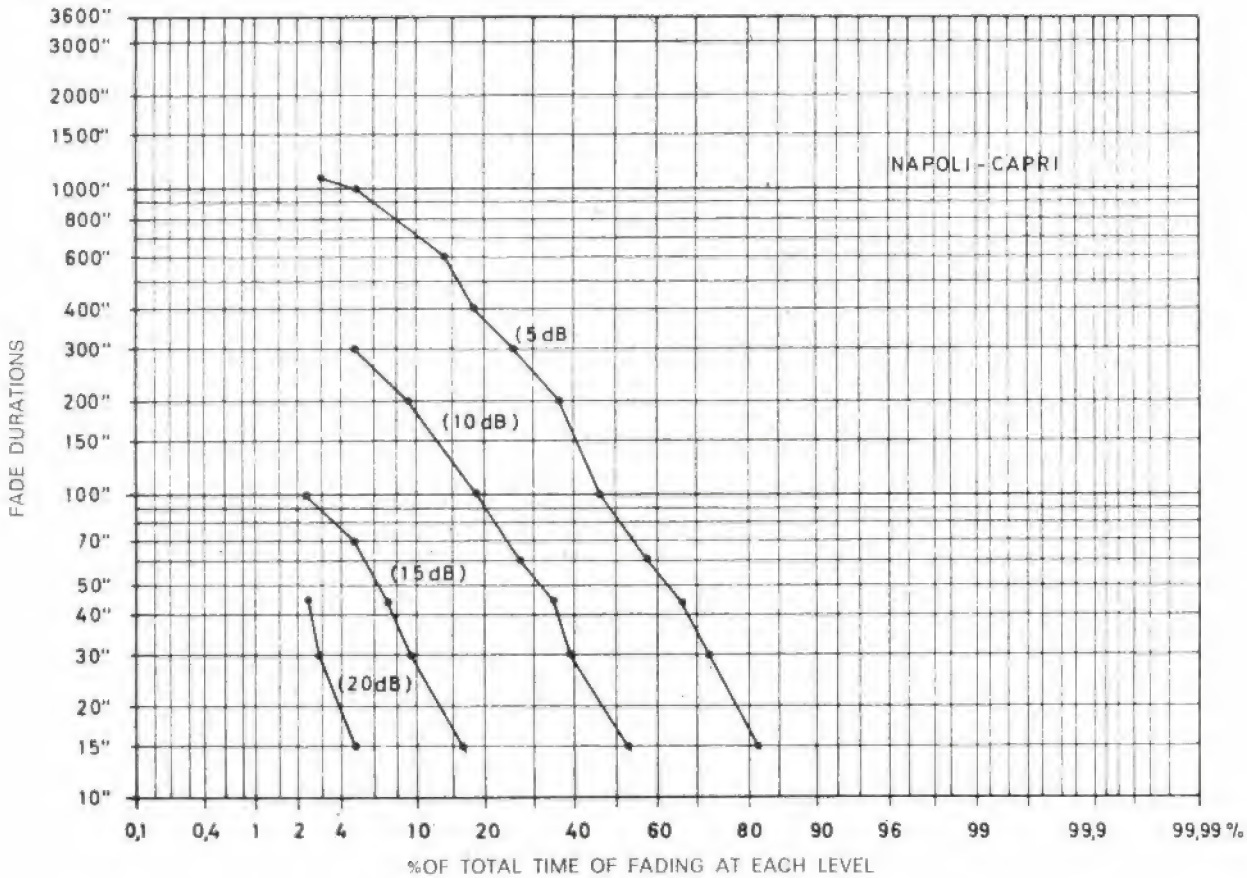

NAPOLI-CAPRI
(5 dB)
(10 dB)
(15 dB)
(20 dB)
FADE DURATIONS
3600"
3000"
2000"
1500"
1000"
800"
600"
400"
300"
200"
150"
100"
70"
50"
40"
30"
20"
15"
10"
0,1
0,4
1
2
4
10
20
40
60
80
90
96
99
99,9
99,99 %
%OF TOTAL TIME OF FADING AT EACH LEVEL

Fig. 13

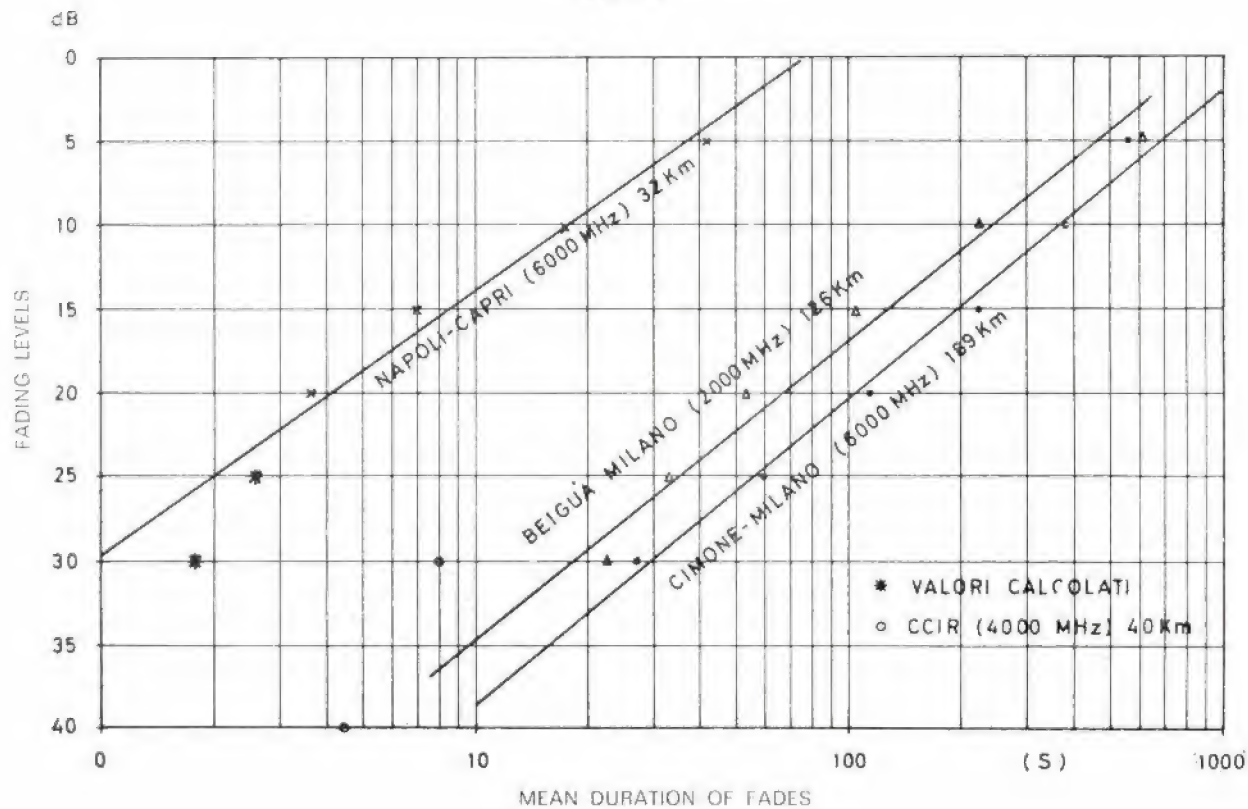

dB
FADING LEVELS
0
5
10
15
20
25
30
35
40
NAPOLI-CAPRI (6000 MHz) 32 Km
BEIGUA MILANO (2000 MHz) 126 Km
CIMONE-MILANO (6000 MHz) 189 Km
* VALORI CALCOLATI
o CCIR (4000 MHz) 40 Km
0
10
100
(S)
1000
MEAN DURATION OF FADES

Fig. 14

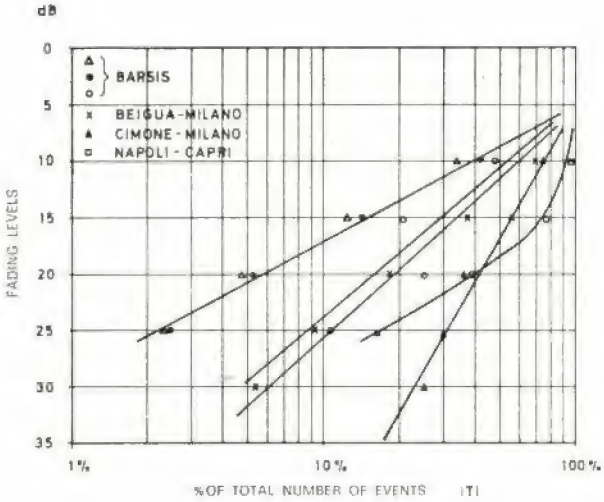


Fig. 15

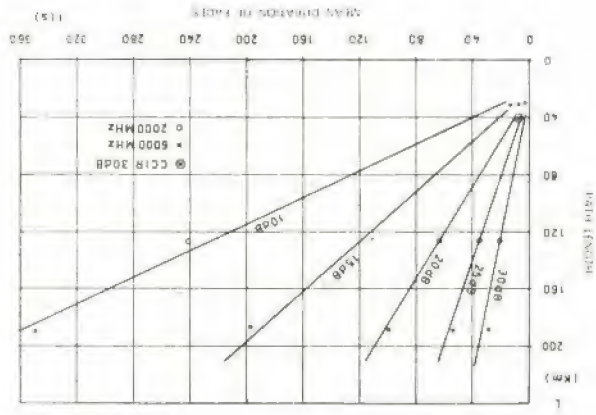


Fig. 16

5. CONCLUSIONS

From all the measurements carried out by the Laboratory F. Vecchiacchi, concerning propagation tests we have chosen those of the paths Cimone - Milano, Beigua - Milano and Naples - Capri, in order to study the distributions of single events. We may conclude that such distributions are log-normal.

Regarding the influence of path characteristics on these distributions, we cannot present precise results, as we only have a reduced number of significant paths.

Anyhow we have tried to carry out an analysis of other conclusions, comparing them with the results here obtained.

This analysis have lead us to the following conclusions:

— the relations proposed by the CCIR [4] as to a reduced number of paths over the United States, do not seem to be usable on the studied paths (vide table II);

— the standard deviation of the distributions studied over the same paths on the United States, seems to have the same value that we have determined on over land paths;

— it seems that other results proposed by the CCIR [7] for total duration of fades, are acceptable when applied to the duration of single events;

— through the experimental data we have analysed it seems that the average duration of fades varies directly with path length;

— the average shape of fades when ploted versus time, seems to depend on the characteristics of the paths. So it has not been possible to define a standard model for its study.

BIBLIOGRAPHY

1 P. Quarta: Prove di ricezione per diversità di frequenza sulla tratta Milano-Beigua, con tre diversi intervalli di frequenza. Alta Frequenza XXX, n.° 12 1961.

2 P. Quarta: Alcuni espetti della propagazione su mare Alta Frequenza, XXXIII, n1, 1964.

3 P. Quarta: Seconda relazione sui risultati delle prove di propagazione eseguite sul percorso Cimone-Milano sulle due frequenze di 2000 e 6000 MHz Relazione Interna n.8/59 del 5.3.1959 della SGTE.

4 CCIR Los Angeles, Report n. 130 Annex, 1959

5 A. P. Barsis, A. F. Berghausen and R. S. Kirby: Studies of Within-the-Horizon propagation at 9300 MHz.
IEEE Trans-Ant. and Prop. January 1963.

6 A survey of Microwave fading. Mechanism, Remedies and Applications. ESSA Research Laboratories ERL 69-WPL4.

7 CCIR, Document V 11, 1963-1966.

8 P. Quarta: Results from propagation tests at 11 and 18 GHz on the path between Montevecchia and Cassina de Pecchi, Alta Frequenza, n. 5, 1967.

9 G. B. Stracca: Propagation tests at 11 GHz and 18 GHz on two paths of different length, Alta Frequenza, XXXVIII, n5 1969.

10 P. Quarta: G. P. Griffini, J. Saraiva Mendes: Misure di attenuazione a 11 GHz sui percorsi Montervecchia-Cassina de Pecchi e Vimercate-Cassina de Pecchi. XVIII Rassegna Internazionale per l'Elettronica Roma, Marzo, 1971.

11 H. Makino and K. Morita: Design of space diversity receiving and transmitting systems for line of sight Microwave links. IEEE Trans. Comm Tech vol. Comm 15, n4 August 1967.

12 CCIR. New Delhi, Rep 338-1, vol II part I 1970.

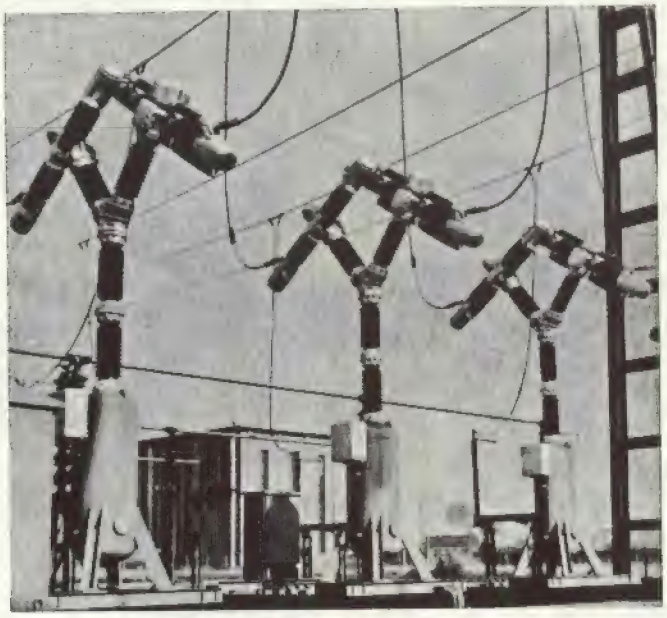
AKNOWLEDGEMENTS

The author wants to thank the SGTE and the Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica who allowed him to carry out the works herebefore described. He also wants to thank the Director of the Research Laboratory F. Vecchiacchi of the SGTE, Prof P. Quarta, as well as Mr. G. Griffini and Mrs E. Cibien Roi for the helpfull cooperation they have given.

Feiras, Conferências, Exposições e Congressos

OBJECTIVOS E PROGRAMA	LOCAL, DATA, ORGANIZAÇÃO E INFORMAÇÕES
CONEX PÓ 75 Exposição Mundial de Máquinas	Chicago Fevereiro - 75
Congresso Interprinta Exposição e demonstrações técnicas	Düsseldorf 20 a 26 de Fevereiro - 75
Foire Européenne du Matériel Didatique	Nüremberg 10 au 14 Mars - 75
Congresso Internacional sobre Structural Questions of Underground Railwais Secretariado: Kospek distudamanyi Egyesület, 1655, Boudapest Kossutk Lajos ter 6-8 Hungary	Hungary Scientific soc for transports 12 a 25 Maio Bulatou füred
Fiabilidade — Aplicação à Indústria	Lisboa 6 - 10 Jan. - 75 COPRAI (Comissão de Produtividade da Associação Industrial Portuguesa)
Introdução à Electrónica Actual	Lisboa 20 - 24 Jan. - 75 COPRAI
Organização do Controle de Qualidade	Lisboa 20 - 24 Jan. - 75 COPRAI
Técnicas de Análise em Laboratórios Industriais	Lisboa 10 - 15 Março - 75 COPRAI

Disjuntores Brown Boveri de ar comprimido para instalações ao ar livre, para as mais elevadas capacidades de ruptura e tensões de serviço



Instalação de disjuntores ao ar livre, de 245 kV, em serviço na Electricité de France, com disjuntores de ar comprimido, tipo DLF 245, capacidade de ruptura 12 GVA.

Fornecemos:

Disjuntores de ar comprimido para instalações ao ar livre, para tensões de serviço de 72.5 até 765 kV
Correntes nominais de 2000 até 4000 A
Correntes de ruptura até 72 kA

- Elevado grau de segurança
- Construção robusta
- Amplas possibilidades de adaptação ao funcionamento com potências mais elevadas de ruptura devido ao tipo de construção por blocos
- Tempos mínimos de disparo
- Aptos a reengate automático rápido

Aproximadamente 20 000 disjuntores Brown Boveri de ar comprimido instalados ao ar livre garantem em 45 países o funcionamento de rêdes de alta tensão.

BROWN BOVERI

Representada em Portugal por:

Sociedade de Electricidade

Brown Boveri Limitada

Rua de Sá da Bandeira, 481-2°, Porto

151 663 d VI

a técnica moderna emprega

BETÕES REFRACTÁRIOS

à base dos cimentos

FONDU LAFARGE

e

SECAR 250

porque são

práticos
eficientes
económicos

REFRACTÁRIOS ATÉ 1800° C

REFRACTÁRIOS ISOLANTES ATÉ 1700° C

Os nossos serviços técnicos, especializados, estão à vossa inteira disposição para estudar, sem qualquer encargo da vossa parte, a adaptação dos BETÕES REFRACTÁRIOS a todos os vossos problemas

AGUIAR & MELLO L.DA

P. do Município, 13-1.º — LISBOA — Tel. 32 11 51/2

C. D. U. 551.501:629.19

OBTENÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS ATRAVÉS DE UM SATÉLITE ARTIFICIAL

BETTENCOURT FARIA
Centro Espacial da Mulemba
Luanda - Angola

PREAMBULO PARA 3 TEXTOS

Os 3 textos seguintes constituem respectivamente as 3 fases do projecto de um pequeno computador: programador de uma antena helicoidal, do Centro Espacial da Mulemba:

1.ª fase — «Obtenção de dados meteorológicos através de um satélite artificial» — Faria, C. B.

2.ª fase — «Tratamento, num computador IBM 1130, da informação àcerca da trajectória de um satélite artificial» — Levy, T.; Loureiro, A.

3.ª fase — «Projecto de um programador digital para para comando automático de antenas usadas na recepção de sinais de satélites artificiais» — Martins, R.; Simões, I.

Este projecto exemplar * constituiu-se como um dos eixos de trabalho do Grupo de Estudos de Cibernética, da Universidade de Luanda, no ano lectivo de 1972-1973 e, por si só, foi revelador de uma prática cibernética de trabalho, ausente ainda das Universidades Portuguesas.

Embora o Centro Espacial da Mulemba não pertença à Universidade de Luanda, nela desenvolve-se uma prática científica, que gostariamos de ver apoiada E neste sentido, a minha colaboração foi a mais modesta homenagem.

Helder Coelho

1. PRIMEIRAS PALAVRAS

1.1 — Um satélite artificial, vogando a uma distância da Terra entre 200 e 36 000 km está em condições de ver grandes extensões do nosso globo. Nós, habitantes deste planeta, não podemos apreciar semelhante espectáculo, já porque estamos muito baixos, já porque nos encontramos mergulhados nos próprios fenómenos atmosféricos que pretendemos estudar.

Inicialmente projectados para fins meteorológicos, os satélites americanos TIROS, ESSA, NIMBUS, ATS, etc., forneceram até hoje, elementos muito mais extensos, aplicados ainda à agricultura, correntes marítimas, formações geológicas, biologia marítima, locais arqueológicos desaparecidos há milhares de anos, localização de balões-sonda, bóias marítimas, rastreio de animais selvagens, deslocamento de «ice-bergs», temperaturas da superfície da água do mar, aperfeiçoamento de localização de ilhas de difícil acesso, alterações da configuração das calotes polares.

Mas é a observação directa do que se passa à superfície da Terra que tem merecido à ciência actual um maior cuidado. Não só os satélites meteorológicos — com aperfeiçoamentos marginais — mas outros, em especial os ERTS — (EARTH RESOURCES SATELLITES) que transmitem preciosas informações.

Com a explosiva expansão, em certas áreas do globo, de herdades, indústrias, minas, etc., o natural aumento de produção de detrictos de vária espécie, logo se verificou a interdependência de todas as actividades humanas, e a crescente necessidade de um controle rigoroso dos mesmos.

A Terra funciona como uma nave espacial, cuja auto-capacidade de manutenção é naturalmente limitada. Se se não exercer um controle no consumo, na natalidade, na poluição de águas e atmosfera, cedo a vida será impossível e o globo se transformará, como o seu satélite natural, a Lua, num mundo morto e selvagem.

O controle das fontes de manutenção da humanidade só pode ser efectuado convenientemente desde que se disponha de abundante somatório de informações, sempre actualizadas, e provenientes de toda a parte do mundo.

* Coelho, H. — «Da organização de um curso sobre Sistemas Digitais» — Electricidade, Maio de 1974

Os satélites, dada a sua situação previlegiada, centenas de quilómetros acima da Terra, são instrumentos de indiscutível valor para esse fim. De acordo com as câmaras que transportam e a distância focal de suas objectivas, «vêem» os diversos tipos de formações de terrenos ,florestas, rios, lagos, etc., isto para darmos apenas uma lista parcial. Se tomarmos estes mesmos satélites, mas equipados com sistemas que possam «ver» as regiões de infra-vermelhos, ultra-violetas e micro-onda, o panorama muda radicalmente. Pode — tanto quanto se sabe de momento — descobrir-se se as folhas estão secas ou viçosas, se a terra se encontra molhada ou não, reconhecer-se os vários tipos de plantas, a espessura do gelo, infestação por insectos, poluição, etc.

Muitas outras aplicações se decobriram para utilização prática, dos instrumentos usados nos vários satélites artificiais [1].

1.2 — O presente trabalho, depois de uma breve descrição histórica das várias tentativas e experiências efectuadas pelos americanos no sentido de conseguir satélites de observação meteorológica realmente funcionais e seguros, é dedicado às técnicas de recepção de fotografias, relevo para o sector explorado no Centro Espacial da Mulemba, em Angola, onde uma estação de rastreio foi projectada e construida em Julho de 1966, mantendo-se operacional até à data em que este relatório é elaborado.

Da utilidade de recepção regular destas fotografias, falam melhor os pedidos que àquele Centro têm sido feitos, tanto o Observatório de Bochum, na Alemanha Federal, como do TROPICAL ATLANTIC LABORATORY (a quem foram remetidas 300 fotografias) — e MISSÃO de ESTUDOS BIOCEANOLÓGICOS e de PESCAS de ANGOLA, que solicitou 6000 cópias de fotos, cobrindo uma zona compreendida entre o Golfo da Guiné e a cidade do Cabo, no Atlântico-Sul.

Afim de se fazer uma ideia da actividade média anual que uma estação de rastreio bem organizada pode conseguir, abaixo apontamos, condensamente, alguns elementos referentes ao «Centro» — de Luanda.

Calcularam-se, no Centro Espacial da Mulemba, de Junho de 1966 a 31 de Outubro de 1971, 49.473 órbitas de satélites artificiais, assim distribuidas:

Satélite	*N. de órbitras calculadas:*
ESSA — 2	3.300
ESSA — 4	3.570
ESSA — 6	4.710
ESSA — 8	15.960
NIMBUS — C	4.533
NIMBUS — 3	8.950
NIMBUS — 4	2.658
ITOS — 1	5.302
ATS — 3	490

Receberam-se, a partir destes cálculos, em cada ano, o seguinte quantitativo de fotografias:

1966	—	270
1967	—	591
1968	—	1.476
1969	—	1.702
1970	—	2.232
1971	—	1.559
TOTAL		7.830 fotos

2. UM SATÉLITE ARTIFICIAL: «ESSA-8»

2.1 *Histórico*

Desde os dias, já distantes, em que o ARMY SIGNAL SERVICE decidiu iniciar, nos ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA, em 1870, as primeiras observações meteorológicas para fins militares, até 1960 quando foi lançado o primeiro satélite meteorológico americano, o TIROS-I, em 1 de Abril daquele ano, muito se passou no campo da investigação cientifica. Foi o início de uma nova era, vantajosamente beneficiada pela possibilidade de observação das camadas de nuvens a partir de uma altura superior a 600 km.

Remetemos os leitores interessados na história dos satélites meteorológicos para o trabalho SATÉLITES ARTIFICIAIS AMERICANOS PARA FINS METEOROLÓGICOS, do mesmo autor [2], onde se encontram os elementos detalhados sobre os mesmos.

Apontamos aqui, como elemento de referência, o satélite ESSA-8, operacional em fins de1972, com as características seguintes:

Data de lançamento:

15 de Dezembro de 1968.

Potência do emissor APT:

5 watts.

Frequência de transmissão APT:

137.620 MHz.

Número de linhas por imagem:

800.

Duração de transmissão de cada imagem:

200 segundos.

Intervalo de tempo entre o início de uma fotografia e a seguinte:

358 segundos.

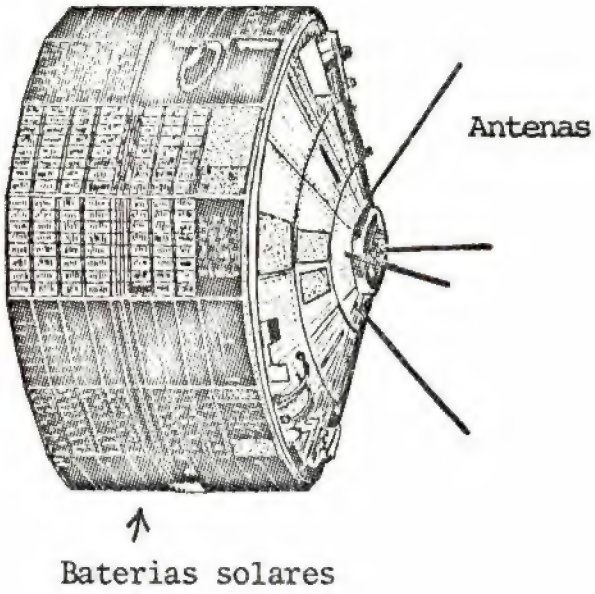


Fig. 1 — Aspecto típico de um satélite da série «ESSA»

2.2 — *Sistema de transmissão*

O sistema APT dos ESSA consiste numa câmara fotográfica, um emissor de frequência modulada, projectado para transmitir imagens de televisão das camadas de nuvens que se encontram sob a nave espacial, durante as horas do dia. A transmissão é automática e imediata. Uma estação, em Terra, equipada com antena adequada, receptor e gravador, recebe estes sinais e transforma-os em fotografias, quando o satélite se encontra acima do horizonte, com as antenas do engenho espacial e as do posto de recepção, à vista uma da outra, durante o dia.

As câmaras do satélite impressionam uma placa especial, que mantém a imagem latente durante mais de 5 minutos. A exposição dura 8 segundos que são aproveitados para, no início de cada emissão, se transmitir um sinal de arranque, de 30 Hz e impulsos de sincronismo de amplitude correspondendo ao «branco». Estes impulsos automaticamente são deslocados para a esquerda, na fotografia, até que se fixam no extremo desse mesmo lado, no início de cada linha de 250 milisegundos. No intervalo que se segue a imagem é pesquisada e os sinais transmitidos, formam uma imagem de 800 linhas (200 segundos), linhas estas que são perpendiculares ao plano de deslocamente da órbita do satélite.

Além do sistema tradicional APT, os satélites ESSA transportam também equipamento DRIR (Direct Reodout Infra-Red) — leitura directa em infra-vermelhos — que consise num radiómetro ligado a um emissor transmitindo perfis em linhas de longa duração, de radiação emitida em reflectida, que se podem transformar em imagens de nuvens.

3. COMUNICAÇÃO COM O SATÉLITE:

3.1 *Estação receptora:*

O projecto do equipamento receptor para um emissor, de uma dada frequência e potência, suspenso no espaço a determinada distância, obedece a vários parâmetros. Se assumirmos que iremos receber sinais que provêm de uma fonte de energia electromagnética encontrando-se, digamos, a uma altura de cerca de 10 a 15° acima do horizonte, poderemos admitir, para uma distância de 1000 km, uma cobertura de cerca de 2360 km de raio. Verifica-se, na prática, que devido a factores secundários, tais como refracção troposférica, sinais ocasionais trans-horizontes, etc., a área coberta é geralmente um pouco maior.

Se, por outro lado, num mapa de projecção Mercator (meridianos e paralelos de latitude, em linhas rectas, cujas distâncias aumentam à medida que se aproximam dos polos) traçarmos as áreas cobertas por uma emissão proveniente do espaço, com as características atrás mencionadas, logo verificaremos que há deformações nas zonas polares, sendo a maior regularidade notada junto ao Equador.

Com as fotografias são transmitidas, não sob a forma de imagens circulares, mas sim como quadrados, dá-se, portanto uma deformação trapezoidal na direcção dos polos, quando as estações se encontram em latitudes muito altas ou muito baixas.

O cálculo da energia relativa, transmitida e recebida por um satélite artifical, prevê-se, a partir dos elementos de projecto, fornecidos pelo fabricante do engenho espacial, e de acordo com a existência ou não de um pré-amplificador de antena, como segue:

	Com pré-amplificador		*Sem pré-amplificador*	
Sinal-ruído	1000	3000	1000	3000
Distância Relação	33.1 dB	23.35 dB	28.5 dB	17.3 dB

Estes valores baseiam-se nos seguintes parâmetros:

Potência emitida — 5 W.
Ganho da antena do satélite — 1.63 (2.1 dB)
Relação «frente-costas» da antena receptora — 20 dB (pelo menos)
Perdas por polarização linear — 3 dB
Temperatura da antena em graus Kelvin — 1000° K.
Ganho da antena receptora (referido a um irradiador isotrópico) — 12 (10.8 dB min)
— Circular (dextr.)
Ondas estacionárias da antena receptora — 1.2 : 1
Figura de ruído de pré-amplificador — 2 (3 dB)
Centro de pré-amplificador — 23 dB

Perdas no cabo entre a antena (com o pré-amplificador) e o receptor	— 1 dB
Figura de ruído do receptor	— 10 (10 dB
Largura de banda do receptor	— 45 KHz

Fazemos notar que as relações sinal-ruído apontados acima, são consideradas como satisfatórias para obter fotografias com detalhe conveniente. No entanto, quando a distância entre a estação receptora e a antena é relativamente grande, digamos superior a 30 m a instalação de um pré-amplificador junto à antena é fortemente aconselhável. Acrescentamos que na prática se verifica que a existência deste pré-amplificador melhora substancialmente o equipamento, porquanto fornece uma margem confortável para as eventuais más pontarias das antenas, que ocorrem quando há incorrecção de ajuste no equipamento de controle remoto ou cálculo pouco exacto, a partir de elementos de menor precisão.

Na sua forma mais completa, uma estação receptora de sinais de satélites meteorológicos compõe-se do seguinte:

a) — Antena para 136 a 138 MHz.
b) — Comando remoto e controle da posição da antena.
c) — Pré-amplificador, 136/138 MHz.
d) — Conversor 136/138 — 26/28 MHz.
e) — Receptor de frequência modulada 26/28 MHz.
f) — Gravador de fita magnética de 2 canais.
g) — Registador de «facsimile».
h) — Adaptador para recepção em infra-vermelho.
i) — Gerador de 480 Hz.
j) — Divisor de frequência (÷ 4; ÷ 5; ÷ 6).
k) — Gerador de rampa, de 300 segundos.
l) — Amplificador de audio.
m) — Cronómetro.
n) — Oscilocópio monitor.
o) — Relógio.

NOTA 1. — O registador de facsimile (alínea g) pode ser substituido, como veremos adiante, por um osciloscópio com câmara fotográfica.

NOTA 2 — O gravador de fita magnética, de 2 canais referido na alínea f) — pode evitar-se se não se desejam guardar as fotografias. No sistema osciloscópio é perfeitamente dispensável, uma vez que as fotos são feitas em negativo, constituindo assim material de fácil arquivo e referência futura, quando devidamente identificados.

NOTA 3 — Nas estações que apenas desejam receber imagens a preto e branco, o adaptador para recepção a infra-vermelho, indicado na alínea h) — é inútil.

NOTA 4 — Tanto o relógio como o cronómetro podem ter mecanismos eléctricos ou electrónicos (digitais).

NOTA 5 — A estação pode funcionar sem o osciloscópio monitor indicado na alínea n). No entanto constitui um precioso auxiliar para controle constante da intensidade de imagem.

NOTA 6 — O gerador-padrão de 480 ciclos pode ser substituido por qualquer outro de frequência diferente, desde que a divisão dê, no final da contagem, os 4 Hz desejados para sincronização do equipamento. No caso apontado temos:

480 : 4 = 120
120 : 5 = 24
24 : 6 = 4

Se dispusermos 1600 ciclos, poderiamos, por exemplo, fazer a divisão como segue:

1600 : 4 = 400
400 : 4 = 100
100 : 5 = 20
20 : 5 = 4

3.2 *Antena:*

Admitem-se como parâmetros desejáveis, para uma antena destinada à recepção de sinais de satélites artificiais meteorológicos, os seguintes:

Frequência	— 137.000 MHz ± 2 MHz
Ganho	— Superior a 10 dB
Largura do ângulo recebido	Plano em elevação — 50° aprox. Plano em azimute — 70° aprox.
Impedância	— 50 ohms
Relação de ondas estacionárias	— 1,2 : 1 (ou melhor)
Polarização	— Circular, dextrógira
Relação axial	— 1 dB
Relação frente-costas	— 20 dB (pelo menos)

Existem numerosas modalidades de antenas para VHF, todas mais ou menos funcionais. Damos a seguir elementos condensados sobre duas das mais populares: helicoidais e do tipo Yaggi. As primeiras são preferíveis pela maior facilidade de montagem e menor custo.

3.2.1 *Antena Helicoidal*

É, pela relativa facilidade de construção e óptimos resultados, a mais indicada.

Pode ser formada por um, dois ou mais helicóides, de acordo com o ganho pretendido, tendo-se em atenção que quanto maior o número de elementos tanto mais fechado será o ângulo de recepção. A experincia indica que se obtém bons sinais com um helicóide simples, de 6 a 8 espiras. A única desvantagem em relação a 2 antenas, por exemplo, é que dada a sua impedância

— cerca de 130 ohms — necessita de um transformador de adaptação, de 1/4 de onda. Se usarmos cabo coaxial de 50 a 75 ohms, com 2 antenas obtém-se directamente a impedância certa.

Vejamos agora as características teórico-prático de uma antena helicoidal típica.

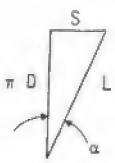
Trata-se de uma hélice de modo axial que possui um certo número de características pouco usuais. A mais saliente é por certo a propriedade de manter uma relação de radiação (e recepção) — da ordem dos 1 : 1,7, com a directividade e ganho sempre na mesma direcção.

A combinação mais conveniente para este tipo de antena é a que se se mostra no desenho axeno em que tomaremos os seguintes símbolos para descrever o helicoidal e seu plano de terra:

D = Diâmetro do helicoide.
S = Espaço entre espiras (centro a centro).
α = Ângulo do passo ($\tan^{-1}$ (S/ D))
L = Comprimento de um espira.
n = Número de espiras.
A = Comprimento axial
d = Diâmetro do condutor usado no helicoide.
g = Distância da primeira espira ao plano de terra.
G = Diâmetro do plano de terra.

Se desenrolarmos uma espira e a colocarmos numa superfície plana, o perímetro (π D), o espaço entre espiras (S) e o ângulo do passo (α) podem exprimir-se sob a forma de um triângulo.

Condensamos a seguir o resultado que a prática considerou favorável ao cálculo de antenas helicoidais (λ = comprimento de onda em metros):



D = 0,32
S = 0.22
G = 0,8 (mínimo)
d = 0,02 (pode usar-se chapa)
g = 0,12

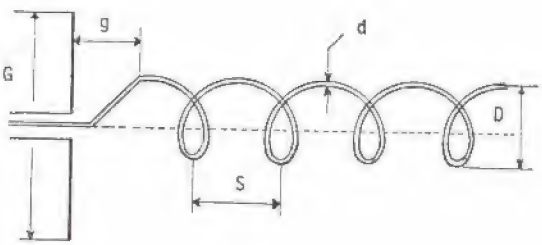


Fig. 2

A largura de banda (L_B) entre 2 pontos representando meia-potência, é dada com grande aproximação por:

$$L_B = \frac{52}{\frac{C}{\lambda} \sqrt{\frac{nS}{\lambda}}} \text{ (graus)}$$

em que:

λ = Comprimento de onda no espaço livre.
S = Espaço entre espiras.
C = Perímetro de helicóide.
n = N.º de espiras.

O ganho em potência (G_p), em relação a uma antena isotrópica polarizada circularmente, encontra-se usando a seguinte expressão:

$$G_p = 15 \left(\frac{C}{\lambda}\right)^2 \frac{nS}{\lambda}$$

ou, se pretende em dB:

$$G_p \text{ (dB)} = 11.8 + 10 \log_{10} \left[\left(\frac{C}{\lambda}\right)^2 \frac{nS}{\lambda} \right]$$

Vimos que as antenas helicoidais usadas para recepção de sinais de satélites artificiais tinham — usualmente as espiras enroladas no sentido do movimento dos ponteiros dos relógios (dextros). A vantagem desta configuração é dada pela verificação experimental de que a fase relativa de propagação da onda no helicoidal cumpre um máximo de directividade quando o condutor é enrolado deste modo. A relação axial (Ra) pode achar-se aproximadamente por:

$$Ra = \frac{2n + 1}{2n}$$

Falta-nos finalmente conhecer a impedância terminal (R) do helicóide que, como resultado de um grande número de medidas em antenas deste tipo, se pode avaliar, com um erro de ± 15% pela seguinte expressão:

$$R = \frac{140\ C}{\gamma} \text{ (ohms)}$$

Com C = perímetro do helicóide

Se se pretende montar 2 ou 4 antenas no mesmo reflector (plano de terra), este terá 2,5 a 3 comprimentos de onda, de lado, e os centros dos «núcleos» das antenas ficarão a uma distância mínima, uns dos outros, de 1,5 comprimento de onda.

Os técnicos alemães, adoptam um critério baseado nos dados que se ilustram a seguir:

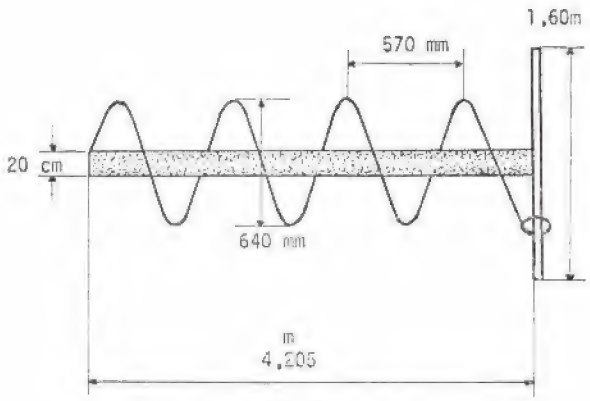


Fig. 3

Analisando as medidas utilizadas por vários fabricantes na construção de antenas helicoidais, projectadas especialmente para a recepção de sinais de satélites artificiais, entre 136 e 138 MHz (frequência central 137 MHz), verificam-se tolerâncias que indicam não ser muito crítico o cálculo dos respectivos parâmetros. O mapa abaixo inscrito mostra o que acabamos de afirmar.

ROTHAMMEL		RHODE & SCHWARZ	TACCO	KRAUSS
D	69,63 cm	64,0	70,0	70,4
S	52,55 cm	57,2	55,5	48,4
g	28,00 cm	26,5	26,0	26,4
G	219,00 cm	160,0	165,0	176,0

D = Diâmetro do helicóide
S = Espaço entre espiras
g = Distância da primeira espira ao reflector
G = Diâmetro do reflector (plano de terra).

É de notar que eventualmente as diferenças apontadas se referem, em especial no que respeita à firma alemã RHODE & SCHWARZ, a uma melhoria de linearidade de resposta de frequência sem prejuízo para o ganho da antena. As estruturas de suporte, — com excepção do helicóide, reflector, transformador e torre, com seus mecanismos de movimento em altura e azimute, — são totalmente feitos em material plástico, núcleo cenral, suportes de espiras, braçadeiras, parafusos e porcas. Nas antenas fabricadas por firmas americanas, que tivémos ocasião de analisar em pormenor, só os suportes das espiras e saídas para o transformador são isolados.

TRANSFORMADORES DE IMPEDÂNCIA

Vimos já como se calcula a impedância terminal de um helicóide. Para a frequência de 137 MHz e como resultado de várias medidas efectuadas, adopta-se o valor médio de 130 ohms. Os cabos coaxiais mais frequentemente usados, têm uma impedância característica de 52 ou 75 ohms, portanto a sua ligação directa à antena traduzir-se-á numa falta de adaptação com importantes perdas por ondas estacionárias.

A não ser que se instalem, num mesmo suporte, 2 helicóides em paralelo, a montagem de um transformador de impedância, de 1/4 de onda, é, pois, imperativa.

Como é geralmente sabido a relação de impedância é dada por:

$$Z = \sqrt{Z_E \, Z_S}$$

em que:

Z = Impedância do transformador
Z_E = Impedância de entrada
Z_S = Impedância de saída

Se tomarmos $Z_E = 130$ ohms; e $Z_S = 75$ e 55 ohms respectivamente vem:

$$Z = 130 \times 75 = 98{,}74 \text{ ohms}$$
$$Z = 130 \times 55 = 84{,}56 \text{ ohms}$$

Por outro lado de impedância de um coaxial (tipo de transformador que escolhemos) — é-nos fornecida por:

$$Z = 138 \log \frac{D}{d}$$

com:

D = Diâmetro interno do tubo exterior
d = Diâmetro do condutor interior.

Basta-nos, pois, escolher o diâmetro interno do tubo exterior (D) para se calcular facilmente o diâmetro do condutor interno (d). Na prática verifica-se que há suficiente exactidão nas seguintes relações.

O comprimento do transformador é de 1/4 de onda, o que nos dá:

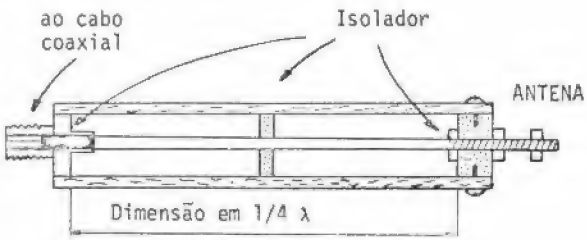


Fig. 4

136 MHz = 2,20588 m. = A	A : 4 = 0,55147
137 MHz = 2,18978 m. = B	B : 4 = 0,54745
138 MHz = 2,17391 m. = C	C : 4 = 0,54348

Adoptaremos a dimensão média, para 137 MHz, arredondando, para 55 cm.

GANHO EM RELAÇÃO AO N.º DE ESPIRAS

Ainda que saibamos já que quanto maior o n.º de espiras tanto mais elevada é o ganho da antena helicoidal, devemos ter sempre em linha de conta que diminui ao mesmo tempo o ângulo de recepção, o que torna mais crítica a pontaria. Isto é importante se nos lembrarmos que as próprias predições da NASA nem sempre são exactas quanto se desejaria. Vejamos, no quadro seguinte a relação verificada, na prática, entre o ganho, o número de espiras de um helicóide, e a abertura do ângulo de recepção (AR).

N.º de espiras	*Ganho em dB*	*AR*
4	7,0	56
5	9,0	48
6	10,3	45
7	11,7	42
8	12,7	39
9	13,0	37
10	13,7	35
11	13,9	33
12	14,0	31

3.2.2 — *Antenas YAGGI/UDA*

Quase simultaneamente no Japão e na Inglaterra, dois cientistas de diferente nacionalidade surgiram com a mesma descrição de um novo tipo de antenas; o professor S. Uda, da Unversidade Imperial de Tohoku (1926/1927) e H. Yagi (Junho 1928). Por isso mesmo denominada Yaggi/Uda, a antena é constituída por uma série de elementos directores, dispostos linearmente, a que se segue o elemento excitado, atrás do qual é instalado o reflector. Tem a polarização definida pelo plano dos respectivos componentes, o que, na forma simples, a tornaria inadequada para a recepção de sinais de uma nave espacial cujas antenas variam de posição em relação à estação receptora, em Terra.

Dada a facilidade de construção, economia de preço e eficiência, foi necessário estudar a sua utilização para a recepção de sinais de satélites artificiais, em que é indispensável a polarização circular. Obteve-se esta configuração mediante a montagem de duas antenas cruzadas ou, sendo preferível a montagem em separado, num plano de 90°, inclinando uma em relação à outra, de 45°.

Existe, na prática, uma variação óptima, quanto ao número de elementos directores e sua separação, afim de se obter um determinado ganho e uma melhor adaptação de impedância ao cabo coaxial que transportará a energia até ao receptor (ou pré-amplificador). Por outro lado quanto maior o número de directores tanto maior também, será o ganho da antena e menor a largura do feixe recebido.

Pelo exame deste quadro se verifica que não há interesse em construir antenas Yaggi/Uda com mais de 15 directores, procurando-se antes aumentar o ganho pela montagem de conjuntos de antenas simples ou cruzadas, conforme o tipo de polarização desejado.

N.º de directores	*Largura de feixe (graus)*	*Ganho (dB)*
30	22	22
20	26	21
13	31	15
9	37	13
4	46	8

O comprimento óptimo dos directores (em comprimentos de onda), é ainda função do número de elementos.

N.º de directores	*Comprimento dos directores (comp. de onda)*
42	0,385
30	0,400
20	0,407
13	0,414
10	0,420
7	0,423
5	0,434

Se tomarmos como mais aconselhável, na prática, a utilização de uma antena com 13 directores, verificamos que uma oscilação de medida destes elementos entre 0,5 e 0,34 de comprimento de onda, nos fornece uma vasta gama de impedância de entrada, adequada portanto ao projecto de uma antena a adaptar a determinado cabo disponível para o efeito.

Impedância de entrada de uma antena-tipo, de 13 directores, com reflector de um comprimento igual a 0,5 e distância entre directores de 0,34 (medidas em comprimento de onda):

Distância do reflector ao elemento excitado em comprimentos de ondas:	*Distância entre directores em comprimento de onda:*	
	0,406	0,420
0,25	62 ohms	50 ohms
0,18	50 »	43 »
0,15	32 »	27 »
0,13	22 »	—
0,10	12 »	—

Podemos tomar como suficientemente exactas, para todos os fins práticos, as seguintes relações:

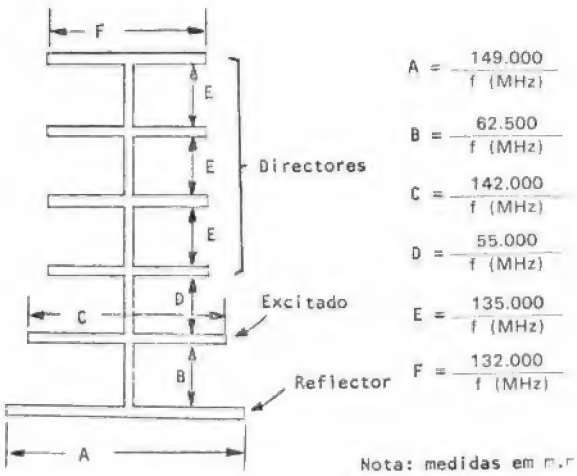


Fig. 5

Em que:

A = Comprimento do reflector
B = Distância do reflector ao elemento excitado
C = Comprimento do elemento excitado
D = Distância do elemento excitado ao primeiro director
E = Distância entre directores
F = Comprimento do director

Para 137 MHz, viria:

A = 1,087 m
B = 0,456 m
C = 1,036 m
D = 0,401 m
E = 0,985 m
F = 0,963 m

3.3 — *Pré-amplificador*

Afim de compensar as perdas eventuais no cabo de ligação da antena ao receptor, é da maior conveniência instalar um pré-amplificador junto à antena. Trata-se de unidade simples que em rigor pode usar nuvistores, válvulas, transistores (FET's ou outros adequados para VHF ou UHF). Existem numerosos circuitos, todos funcionais. Modernamente preferem-se os FET's ainda que, nas regiões sujeitas a trovoadas não sejam muito aconselháveis, pela facilidade com que uma descarga electrostática os destroi. A impedância de entrada e saída deve ajustar-se à da saída da antena e entrada do receptor, cuidando-se que tenha um nível de ruído o mais baixo possível, por cuidadosa neutralização. Tratando-se de equipamento que vai ficar exposto a intempérie, convém que esteja incluido numa caixa estanque à humidade. Alguns fabricantes utilizam invólucros de alumínio fundido com tampa fixada por vários parafusos e usando junta adequada. A entrada e saída de radiofrequência, bem como os ajustes de sintonização, fazem-se por fichas instaladas em baixo. Frequentemente a tensão de alimentação é proveniente do próprio receptor.

ESPECIFICAÇÕES ACONSELHÁVEIS PARA O PRÉ-AMPLIFICADOR:

Frequência central	— 137 MHz
Largura de banda a 3-dB	— 5 MHz
Figura de ruído	— 4 dB
Ganho	— 20 a 40 dB
Impedância de entrada	— 50 ohms
Relação de ondas estacionárias	— 1.2 : 1

3.4 — *Filtro bipolar pré-selector:*

Alguns fabricantes aconselham e adopam a instalação de um filtro pré-selector entre a antena e o conversor, mas não é prática obrigatória. O filtro que melhor satisfaz o compromisso entre perdas por inserção e dimensões físicas, é o duplo, de cavidade, com condutor central.

3.5 — *Conversor*

O sinal recebido pela antena, seleccionada pelo filtro e subsequentemente amplificado, sofre um aumento de amplitude no andar frontal do conversor, antes de ser transformado numa frequência de 26 a 28 MHz, por batimento com um oscilador local, comandado a cristal de quartzo.

PARÂMETROS TÍPICOS DO CONVERSOR:

Frequência de entrada	— 136/138 MHz
Frequência de saída	— 26/ 28 MHz
Largura de banda	— > 2 MHz
Ganho	— > 20 dB
Figura do ruído	— < 2,0 dB

Ainda que existam, modernamente, os mais variados tipos de conversores, usando desde válvulas e nuvistores, até aos semicondutores — transistores de sinal, FET's, diodos tunel — etc., o princípio fundamental é sempre o mesmo: um dos dois andares amplificadores de rádio frequência, sintonizados à frequência de 136 a 138 MHz; o primeiro tem de ser convenientemente projectado e construído, pois dele depende a relação sinal-ruído. Há interesse em que possua alto ganho, mas os componentes a usar não devem contribuir, por si mesmos com agitação térmica demasiada. O segundo andar deste amplificador é acoplado ao anterior, mediante um círculo duplo, sintonizado, cuja duplicidade estabelece a largura de banda requerida. Segue-se o misturador, também ligado ao anterior com circuito duplo, sintonizado.

A saída fornece a frequência intermédia, de 26 a 28 mHz a ser aplicada à entrada do receptor. Acoplado a este misturador temos o oscilador local (também por meio de circuito duplo) — sintonizado — que lhe injecta o sinal de mistura, e garante uniformidade de resposta na frequência intermédia. Este oscilador pode ser auto-multiplicador ou terá um ou mais andares para o efeito. Em regra utiliza-se cristal de quartzo, para boa estabilidade, na normalidade de «overtone».

3.6 — *Alinhamento e características de ruído:*

O alinhamento do conversor faz-se pela seguinte ordem:

a) — Oscilador local e seus eventuais andares;
b) — Amplificador ou amplificadores de rádio frequência;
c) — Secção de frequência intermédia.

FIGURA DE RUÍDO:

Usa-se um gerador de ruido de largo espectro e impedância igual a 50 ohms. Ligado ao conversor, a sua saída segue através de um atenuador comutável de 3 dB, para uma ponta detectora que irá indicar num voltímetro de corrente alterna, a saída do sinal. Comparando o nível próprio do equipamento a plena amplitude — e com atenuação de 3 dB — com a que se obtém a partir do gerador de ruído, ficamos a conhecer a relação que, como vimos já deve ser inferior a 2 dB.

Os conversores utilizados no Centro Espacial da Mulemba, tem todos um nível de ruído de 1,8 dB.

3.7 — *Receptor*

Naturalmente o receptor é a unidade mais complexa do sistema. As suas características devem, para o caso presente, formular-se do seguinte modo:

Tipo	— Dupla conversão, superheterodino frequncia modelada.
Entrada	— 26/28 MHz.
Nivel de entrada	— 90 dBm a — 50 dBm.
Largura de banda	— (pré-detecção) — 30 KHz
Sensibilidade	— 118 dBm de sinal de entrada de rádio frequência para uma saída de uma relação sinal-ruido de 20 dB.

Como exemplo tipico, descrevemos aseguir um dos 3 receptores usados desde 1966 no Centro Espacial da Mulemba.

Originalmente construído pela firma KAAR ENGINEERING CO, em PALO ALTO, Califórnia — U.S.A., para fins de comunicações, foi modificado no C. E. M. para adaptação de sinais de satélites artificiais.

Tem as seguintes características:

Tipo FM-39X	— Superheterodino, dupla conversão.
N.° de válvulas	— 15.
Frequência de entrada	— 26/28 MHz.
Sensibilidade	— > 0,5 V.
1.° oscilador	— Exterior, 20/23 MHz (variável).
2.° oscilador	— Local — 4951.666 KC.
1.ª IF	— 5000/6000 KHz.
2.ª IF	— 455 KHz.
Largura de banda	— 30 KHz.
Detecção	— Discriminador.
Saída de audio	— 8 Ω e 600 Ω.
Relação sinal-ruído	— 20 dB (aprox.).

DESCRIÇÃO:

Três transformadores de rádio frequência sintonizados a 26/28 MHz, o primeiro, simples, e os dois seguintes duplos, constituem o andar frontal do receptor.

Segue-se a 1.ª misturadora que recebe o sinal amplificado, proveniente do conversor, e o mistura com o 1.° oscilador, que no caso presente é instalado a distância, por conveniência operacional. poder-se-ia prever, em vez deste gerador de rádio frequência, uma série de cristais, oscilando na gama pretendida. Preferiu-se, no Centro Espacial de Mulemba, a primeira modalidade, dada não só a dificuldade de encontrar no mercado os cristais de quartzo para a frequência desejada, como ainda porque um oscilador de frequência variável permite desde logo o ajuste manual para as conversões convenientes, devidas a efeitos de DOPPLER.

Nos receptores do C.E.M. o cálculo de frequência a injectar no misturador faz-se usando o seguinte critério:

Vimos já que a frequência de entrada, no conversor ,era de 136/138 MHz, correspondendo a saída a 26/28 MHz. É esta portanto a entrada no receptor. A primeira frequência intermédia é de 5000 a 6000 KHz, e a segunda de 455 KHz. Nos equipamentos adaptados existia já um 2.° oscilador com cristal de 4951,666 KHz pelo que teve de se combinar esta frequência com a do 1.° oscilador afim de obter as frequências intermédias correctas. Sendo o 1.° oscilador de frequência, de tipo variável, era indispensável que cobrisse as frequências normalmente utilizadas (em APT) pelos satélites meteorológicos americanos. Até hoje foram os seguintes:

ATS — 3	— 135.600 MHz
NOAA — 1	— 136.700 MHz
Todos os NIMBUS	— 136.950 MHz
ESSA 2 a 6	— 137.500 MHz
ITOS — 1	— 137.500 MHz
ESSA — 8	— 137.620 MHz

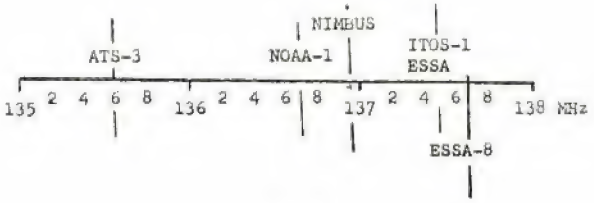


Fig. 6

O conversor (com oscilador local de 110 MHz) transforma estas frequncias nas seguintes:

135.600 em 25.600 MHz
136.700 em 26.700 MHz
136.950 em 26.950 MHz
137.500 em 27.500 MHz
137.620 em 27.620 MHz

A primeira frequência intermédia resulta da combinação (soma ou diferença) deste sinal com o que for gerado no oscilador ajustável (1.° oscilador) e que, como vimos já, tem que corresponder a qualquer frequência entre os limites de 1.ª FI (5000 a 6000 KHz), por outro lado, e como é conhecida a frequência do cristal do 2.° oscilador (4951,66 KHz), o batimento deste com a 1.ª FI terá de dar sempre a 2.ª FI, de 455 KHz. A frequência de injecção do OFV (Oscilador de Frequência Variável) é pois importante, e no caso presente, em que foi previamente fixada a frequência do 2.° oscilador, calcula-se como segue:

1.ª FI = Fc + 2.ª FI

com

FI = Frequênca intermédia
Fc = Frequência do cristal

Temos portanto, para 2.ª FI = 455 KHz
e Fc = 4951,666 KHz:
1.ª FI = 4951,666 + 455 = 5406,666 KHz

Subtraindo a frequência de saída do conversor, com a obtida nesta operação, temos finalmente a frequência pretendida para o oscilador variável. Para 26950 KHz por exemplo, seria:

26.950.000
—5.406.666

21..543.334

mantendo-se a mesma relação de FI.

Nas várias frequências usadas pelos satélites, temos, pois:

Freq. Satélite	*1.° Oscilador*
135.600	20193.334
136.700	21293.334
136.950	21543.334
137.500	22093.334
137.620	22213.334

Donde se conclui que a gama de sintonia deste oscilador é muito pequena, bastando ocupar uma faixa entre 20 e 23 MHz, para cobrir todos os satélites APT.

Como a maior estabilidade se consegue em frequências mais baixas é usual utilizar o oscilador de comando, numa frequência 3 a 4 vezes inferior, procedendo-se à necessária multiplicação em um ou mais andares de rádio frequência.

O circuito de rádio-frequência fica assim concebido, do seguinte modo: (exemplo para 136.950 MHz):

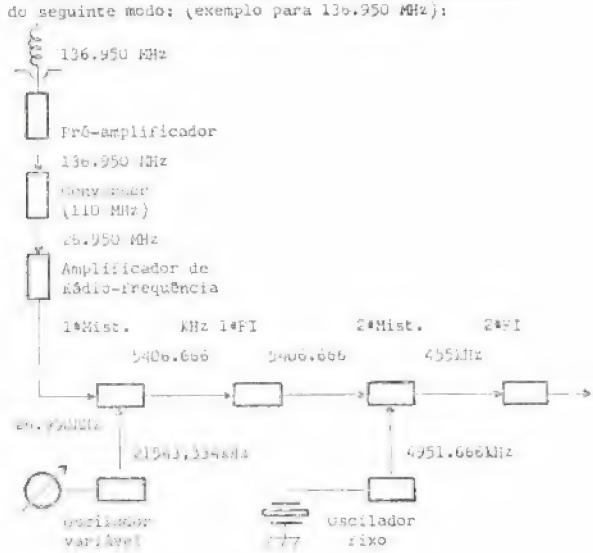


Fig. 7

Seguem-se os habituais andares, limitador-discriminador-audio. O discriminador neste equipamento tem uma largura de faixa de 50 KHz, sendo capaz de sintonizar entre 430 e 480 KHz, e está equipado com um micro-amperímetro de 0-50 mA (zero ao centro), fundamental para sintonias exactas e correcção de desvios por efeitos de DOPPLER.

3.8 — *Sistema tradutor de imagem:*

Existem, em princípio, dois sistemas diferentes: FACSIMILE e OSCILOGRÁFICO. O fim de qualquer deles é precisamente analizar e transformar, em forma visível e permanente, a informação enviada pelos satélites. Tanto um como o outro necessitam possuir os circuitos necessários para extrair a frequência de sub-portadora (2400 Hz) o sinal de arranque, (300 Hz) e os 4 Hz de sincronização de linhas.

Especificação típica de um tradutor «Facsimile»

Sinal de entrada — sinal de video, modulado a 2.400 Hz:

Nível	— 0 a + 20 dB
Impedância	— 600 ohms

Sinal de saída — sinal remodulado:

Nível	— Ajustável de 0 a + 10 dB
Impedância	— 600 ohms

Saídas de sincronização:

Frequência	— 1.2 KHz e 480 Hz
Nível	— Ajustável de 0 a 4 v.
Impedância	— 600 ohms

Sincronismo de linhas:

Frequência	— 4 Hz
Nível	— aprox. 14 v.
Impedância	— 600 ohms
Densidade de pesquisa	— 35,4 linhas/cm. (90 linhas/polegada)
Velocidade do helicóide	— 240r.p.m.
Dimensão da imagem	— 228,6x228,6 cm. (9x9 polegadas)

NOTA: Para a recepção de fotografias en infra-vermelho, o equipamento deve estar preparado para modificar a velocidade de rotação do helicoide para 48 linhas por minuto.

3.9 — *Equipamento oscilográfico:*

Neste sistema, as fotografias são obtidas por meio de uma câmara fotográfica instalada em frente a um tubo de raios catódicos de face plana. As linhas com duração de 1/4 de segundo cada uma, deslocam-se com regularidade, de cima para baixo, formando uma imagem completa em 200 segundos. Neste intervalo de tempo o obturador da objectiva mantém-se aberto, enquano o diafragma foi pré-fixado para pequena abertura (geralmente entre f:11 ou f:16). A focagem do ponto electrónico é efectuada com todo o cuidado, para que seja do menor diâmetro possível, e a sua imagem absolutamente circular. O controle do brilho faz-se por comando remoto afim de garantir a presença de «negros» nas fotografias.

Ainda que as fotos obtidas com aparelhos de facsimile, do tipo Hell, sejam um pouco melhores, quanto a definição, do que os conseguidos através de um oscilógrafo de raios catódicos, podem os últimos considerar-se como plenamente satisfatórios para todos os fins práticos, tendo-se em atenção a importante economia resultante, quanto ao custo do equipamento.

Por outro lado, como o processo oscilográfico utiliza película vulgar, (formato 6x6 — 22 a 24 DIN) não há problemas quanto a stock de material sensível, especial.

As condições básicas, exigidas de um oscilógrafo de raios catódicos, para obter reproduções fotográficas de sinais de satélites artificias, com características cientificamente válidas, são as seguintes:

a) — Tubo de raios catódicos de face plana, opticamente perfeita, sem graticula, FÓSFORO P-11, fluorescência e fosforescência azul, baixa persistência.

b) — Grande estabilidade das fontes de alimentação, a longo período;

c) — Ausência de astigmatismo no ponto electrónico, nas extremidades do campo;

d) — Possibilidade de sincronismo exterior;

e) — Perfeita estabilidade da base de tempo à frequência de 4Hz (0,5 seg./cm a 1 seg./ /cm, com variação contínua);

f) — Amplificador vertical de grande linearidade, banda passante de corrente contínua (DC) até cerca de 300 KHz (1mV/cm até 20 V/cm de sensibilidade);

g) — Regulação de foco, intensidade, alinhamento e astigatismo;

h) — Cátodo do tubo de raios catódicos acessível do exterior.

3.10 — *Equipamento acessório*

3.10.1 — *Sincronismo*

Ainda que frequentemente o sinal de 4 Hz a utilizar no sincronismo do equipamento, tanto de facsimile como oscilográfico, seja extraído da portadora do satélite, no Centro Espacial da Mulemba adoptou-se um sistema diferente: partindo de um gerador local de baixa frequência — 480 Hz — faz-se a divisão até obter os 4 Hz. Este processo evita que, por ausência momentânea de sinal (atmosféricos, interferências, etc.) — se perca o sincronismo.

A estabilidade do gerador de 480 Hz é obtida por meio de diapasão, oscilando naquela frequência. A divisão faz-se com multivibradores.

3.12.2 *Gerador de rampa*

O deslocamento vertical do traço no écran do tubo de raios catódicos pode efectuar-se de diversos modos, admitindo que o amplificador respectivo seja de acoplamento directo (D.C.) — todavia, em qualquer caso, a linearidade é fundamental porquanto qualquer perturbação se traduz em traços de desagradável aspecto, na reprodução fotográfica final. No C. E. M. usa-se um gerador de rampa que aproveita as excelentes propriedades de integração de um amplificador operacional, fornecendo não só uma rampa perfeita e isenta de anomalias, como ainda funcionamento cómodo, regular e seguro.

3.11 — *Marcha das operações*

Sintonizados rigorosamente os equipamentos electrónicos, afim de assegurar um máximo de sensibilidade e óptima relação sinal/ruído; regulado o osciloscópio — depois de estabilização de pelo menos, 15 minutos — para obter um ponto o mais pequeno possível, circular e isento de astigmatismo; acertado o início e fim de rampa para uma imagem quadrada (num tubo de 10x8 cm o formato deve ser, por exemplo 7x7 cm — com o início e o fim a cerca de 5 milímetros de cada extremidade); — preparadas as efemérides para pontarias

da antena, afim de a manter orientada para o satélite de minuto a minuto; as operações manuais (que em rigor podem todas ser tomadas automaticamente, sob comando do próprio satélite, que, como vimos, transmite, no início de cada imagem, um sinal de comando, de 300 Hz) — são as seguintes:

a) — Verificação da intensidade do traço no tubo de raios catódicos, de modo a que, nem seja tão intenso que «queime» a película, — originando o desaparecimento de pormenor — nem tão fraco que obrigue a não ficarem registados os «negros» da fotografia.

b) — Logo que seja recebido o sinal de arranque, dar início à rampa linear.

c) — Deslocar o sinal de sincronização de modo a que se fixe na extremidade esquerda ou direita da imagem.

d) — Abrir o obturador da câmara fotográfica que se manterá por si mesmo aberto, na posição de «póse» — enquanto, linha-a-linha a fotografia se for formando.

e) — Termonada a transmissão da informação fotográfica — reconhecida pelo aparecimento de um sinal contínuo de 2400 Hz — fechar o obturador e rodar o maquinismo, que porá nova porção de película sensível em frente da objectiva.

BIBLIOGRAFIA

— Satélites artificiais americanos para fins meteorológicos Bettencourt Faria — Centro Espacal da Mulemba - Luanda
— Satellites at work — NASA
— Project ATS — Release 67-276 — NASA
— Applications Technology Satellites — J. Nangle — NASA
— User's guide APTS ground station — Contract NAS-5-667
— Results of experiments in Space — R. Jastrow Goddard Space Flight Center
— La meteorologie spatiale — Jean Turrière-Sciences et Industries Spatiales
— Development of meteorological observing techniques in the satellite and computer age. B. J. Mason-Journal of Physics
— Putting satellites to work — William Corliss — NASA
— Publications EP-48 NASA
— Ground Receiving Equipment for weather satellites with Automatic Picture Transmission — Franz R. Huber-Rhode & Schwars — Munich
— APT ground stationsfor weather satellites-Bell Telephone Company — Belgique
— APT User's guide — National Weather Satellite Center Washington, D. C. — USA
— The improved TIROS Operational satellite — NASA
— Characteristics of Direct Scannin Radiometer Data-Edward G. Albert — National Environmental Satellite Center.
— Space Physics and Astronomy — William R. Corliss — NASA
— Proceedings of the International Meteorological Satellite Workshop — NASA
— Meteorological and Communicationes Satellites - Michal Lunc — DUNOD — PARIS
— Relatórios anuais da Associação Astronómica de Angola Centro Espacial de Mulemba — CP 1366C Luanda 1967, 68, 69, 70 e 71
— US Satellites, the first 50 — United States Information Service
— Meteorological Satellites and Weather Forescasting — David S. Johnson — VOA Forum Lectures
— Space Research and Meteorology-Harry Wexler
— Space Science aids the Weatherman Francis W. Reichelderfer
— ITOS — Night/Day Meteorological Satellite
— ANTENA ENGINEERING — Jasik
— Antennas — Kraus — Mac Graw-Hill — N. York.
— Microwave Antenna Theory and Design — Samuel Silver
— Space Communications Theory and Applications - NASA
— Microwave Antennas — A. Z. Fradin
— Space Communications — A. V. Balakrishan
— Antennenbuch — Karl Rothammel
— Die Antennennachfuhrung in Satelliten — Empfangsanlagen — Huber, F. R.— Roth, H. — Messen + Prufen — 5 (1969) Nr. 11, S. 799-801.
Da revista: Neues von Rhode & Schwarz:
— Satellite Experiments on Research Ship «Meteor» — Ernst, B. — 9 (1969) Nr. 35, S. 26-28
— VHF Receiving Equipment for Picture Transmissions from Weather Satellites — Helmke, B., Schmidbauer, P. — 9 (1969) Nr. 40, S. 16-21
— Meeting of Satellite Experts at R & S — Machule, B. 9 (1969) Nr. 35, S. 28
— Weather-Satellite Receiving Station in Chile — Stachl, H. — 9 (1969) Nr. 38, S. 35
— Trouble-free Weather Pictures — Machule, B. 10 (1970) Nr. 43, S. 27
— DF Transmitter for Diamant-B Rocket — Pichl, H. 10 (1970) Nr. 43, S.26.

REFERENCIAS:

[1] — Para melhor esclarecimento sobre os diversos usos que se têm encontrado para os satélites artificiais meteorológicos, ver págs. 3 a 8 do nosso trabalho SATÉLITES ARTIFICIAIS AMERICANOS PARA FINS METEOROLÓGICOS.

[2] — Sobre a história da evolução dos diversos satélites artificiais americanos, ver páginas 10 a 28 do mesmo trabalho.

ENERGIE (*)

TECHNIQUES DE L'AVENIR

La situation de l'énergie dans 10 ou 20 ans dépendra das décisions prises aujourd'hui en ci qui concerne da recherche et le dévevloppment, ainsi que la construction de centrales énergétiques.

Ce fait a servi de base débats d'une récente réunion qui a eu lieu à Genève et durant laquelle des délégués de 14 pays ont étudié l'évolution de nouvelles techniques de l'énergie, l'arrière-plan économique et écologique aux innovations dans le secteur de l'énergie, et le rôle de la Comission pour l'Europe de l'Organisation des Nations Unies (CEE) la promotion de l'innovation en matière d' énergie.

Cette réunica a eu lieu sous les auspices des Vonseillers des gouvernements des pays de la CEE pour la spience et la technique, dont une des activités principales est dédiée aux innovations dans le domaine de l'énergie.

Soulignant la durée de chaque étape de l'évolution des techniques énergétiques, une étude préparée pour la réunion par le Secrétariat de la CEE mentionne l'exemple du réacteur surrégénéraeur à neutrons rapides (FBR). Les recherches sur le FBR ont débuté vers la fin des années 40. Plusieurs petits prototypes expérimentaux ont été construis vers la fin des années 50 — par exemple à Dounreay en Ecosse e en URSS. Vers la fin des années 1960 et au début des années 1970, des prototypes plus conséquents ont été construits afin de démontrer les possibilités commerciales du FBR. Si l'on compte deux ans pour les essais sur de grandes installations de démonstration, et cinq à sept ans afin de concevoir et construire les FBR commerciaux, ce genre de centrale nucleáire pourrait être commercialisé aux environs de 1985 — soit quelque 35 ans après le début des recherches.

COUP D'OEIL SUR UN AVENIR PROCHE

Les limites restreintes dans lesquelles l'électricité peut immédiatement remplacer le combustible liquide en tant que source d'énergie dans le le secteur des transports montre bien que du temps sera nécessaire pour effectuer le changement d'une technique à l'autre. Il existe toutefois plusieurs techniques offrant d'intéressantes possibilités à court ou à moyen terme. Quelques-unes d'entre elles ont vu le jour il y a longtemps mais, pour des raisons économiques ou autres, n'ont jamais été largement utilisées.

Une technique intéressante pour s'attaquer aux problèmes de l'offre d'offre d'énergie à court terme consiste en la gazéification et la liquéfaction du charbon; la gazéification semble être un moyen économique pour l'élimination des émissions de soufre qui crée un sérieux handicap vis-à-vis de l'evironnement.

Des recherches sur la gazéification se poursuivent dans plusieurs pays afin d'obtenir un gaz à pouvoir calorifique élevé, sans pour cela subir les inconvénients de la méthode allemande Lurgi, ancienne déjà d'une quarantaine d'années. On espère que la commercialisation pourra entrer en vigueur d'ici deux ans.

D'importantes recherches sur la gazéification sur place ont été effectuées en Pologne et en URSS depuis le début des annés 1960.

La conversion du charbon en une huile combustible a atteint le stade des installations pilotes aux Etas-Unis. Un des problèmes techniques posés par le charbon liquéfié concerne l'éliminaion de l'oxyde d'azote qu'il contient, afin d'assurer la compatibilité avec les normes de pollution.

Entretemps, le charbon entre pour une large part dans les plans de construction des centrales thermiques. En URSS par example, la production d'énergie électrique sera augmentée dans l'avenir immédiat principalement la construction de grandes centrales sur l'emplacement de riches gisements charbonniers dans les bassins d'Ekibastuz et dans certains autres secteurs. Les Etats-Unis et certains pays d'Europe occidentale, qui avaient ralenti ou diminué la production de leur industries minière, envisagent aujurd'hui de développer l'utilization du charbon.

SCHISTES BITUMINEUX ET SABLES ASPHALTIQUES

Dans certains pays tels que le Canada et les Etats-Units qui prossédent de larges gisements de schistes bitumineux et de sables asphaltiques, la commercialisation pourrait être réalisable d'ici le début des années

* NATIONS UNIES
Comission Économique pour l'Europe — 6 Novembre 1974

1980 à la solution des problèmes techniques et écologiques associés à la conversion de ces matiéres primières en combustible.

EVOLUTION NUCLÉAIRE: AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS

Les centrales nucléaires de la «première génération» des avantages économiques sur les centrales thermiques conventionnelles, avantages qui augmentent en même temps que les prix des combustibles fossiles.

Les réacteurs nucléaires actuels utilisent moins de un pour cent de l'énergie naturelle de l'uranium et leur rendement thermodynamique est seulement d'environ 32%. Les réacteurs refroidis au gaz pourront améliorer ce rendement, mais, si l'on on découvvre pas de plus grandes quantités d'uranium, une efficacité réduite constituera un désavantage sérieux pour les centrales nucléaires dans moins de 15 ans.

En l' absence de telles découvertes ou d'améliorations de la technique, le monde pourrait avoir à faire face à la même pénurie d'uranium avant l'an 2000 que celle prévue à l'heure actuelle pour les combustibles fossiles.

Toutefois, la course à l'énergie de «première génération» continue. On estime que, d'ici 1980, 25 pour cent de l'énergie életrique et 10 pour cent de l'énergie totale produits aux Etats-Unis proviendront de centrales nucléaires. Dee 1974 à 1987, on estime que l'Europe occidentale consacrera environ 120 milliards de dollars à la construction de centrales nucléaires. L'URSS exécute actuellement un programe de construction de centrales nucléaires, échelonné sur 10 ou 12 ans, et des réacteurs de la «premiére génération» continuent à être mis au point. Des centrales nucléaires fonctionent en Tchécoslovaquie et en République démocratique allemande, et d'autres vont vont bientôt être mises en service en Bulgarie, en Hongrie, en Pologne et en Roumanie. Cette tendance va se poursuivre jusqu'à ce que les réacteurs surrégénérateurs à fission et les techniques de fusion soint commercialisés.

ENERGIE GÉOTHERMIQUE

Bon marché, et de production relativement simple, l'énergie géothermique ne joue toutefois qu'un rôle mineur sur la scène énergétique mondiale, bien que la première centrale géothermal ait été installée il y a 70 ans à Lardarelllo en Italie. La Nouvelle-Zélande, les Etats-Unis, le Japon et l'URSS — les plus importants exploitants d'énergie géothermique — ont suivi l'Italie; le Mexique est en train de construire une centrale. Il existe également des réservoirs moins chauds qui sont, ou peuvent être, utilisés en remplacement de l'énergie. La capitale de l'Islande, Reykjavik, est presque entièrement chauffée à l'eau chaude d'origine géothermique, ainsi que certaires villes de Hongrie ea d' URSS.

Les progrès techniques permettent une exploitation plus poussée des ressources géothermiques. Autrefois d'un usage très localisé, l'énergie géothermique peut maintenant approvisionner des centrales éloignées grâce aux techniques de transmission par haut voltage. L'hydrogène sulfureux, qui constitui un problème ecologique lié aux opérations géothermiques, peut être extrait chimiquement du gaz non condensable e converti en soufre élémentaire. Enfin, de nouvelles techniques de forage et de complétion des puits pourraient être la source de possibilités de développement plus étendues en ce qui concerne l'énergie géothermique.

SOURCE D'ÉNERGIE À PLUS LONG TERME

Entre autres sources d'énergie à long terme, trois — les réateurs surrégénérateurs (FBRs), les réacteurs de fusion nucléaire et l'énergie solaire — présentent des perspectives prometteuses.

Les FBRs constituent le point d'aboutissement de l'évolution des techniques de *fission*. Ils permettront de récupérer 60 à 75% de toute l'énergie disponible émise par l'uranium utilisé comme combustible et de créer plus de matériaux fissiles qu'ils n'en utilisent. On prévoit que les FBRs ne consommeront que 1,3 tonne d'uranium par million de kW/an d'électricité produite, contre 171 tonnes pour les réacteurs de «prmière génération». En 1973, l'URSS a mis en exploitation avec sucès un prototype industriel du FBR. Un second est actuellement en construction, destiné à la centrale de Biéloyarsk, dans l'Oural. Au début de 1974, le Phénix français a été le premier FBR d'Europe occidentale à être porté à sa puissance maximale. Le projet trinational Super-Phénix, comprenant la France, la République fédéral d'Allemagne et l'Italie, pourrait commencer à fonctioner au début des années 1980, étant entendu que 5 ans seront nécessaires à sa construction. La République fédérale d'Allemagne, le Japon, le Royaume-Uni et les Etats-Unis construisent des FBRs de démonstration.

Deux techniques de contrôle de la *fusion* sont actuellement à l'étude. Elles suscitent beaucoup d'espoirs en vue de la solution du problèms des besoins d'énergie mondiaux à long terme. L'étude appuye l'idée que des recherches parallèles sur deux procédés différents visant au même but pourraient présenter des avantages en termes de coût et de temps; elles consti ent une assurance contre l'échec, et lorsque les deux solutions s'avèrent réalisables, elles permettent de choisir la plus économique d'entre elles.

Une de ces techniques vise à obtenir la fusion thermonucléaire en élevant la température de l'hydrogène servant de combustible à environ 1 million de degrés centigrades à l'intérieur d'un «conteneur» magnétique. La seconde consiste à mitrailler une boulette de deutérium et de tritium par de nombreuses décharges de lasers qui la portent à des température assez élevées pour amorcer la fusion. Ce processus, qui élimine le problème du confinent magnètique, utilise une enceinte sphérique remplice de lithium fondu qui absorde la chaleur. L'énergie puissante obtenue par une série

continue de micro-explosions thermonucléaires est transmise au Tithium fondu environnant qui, à son tour, est utilisé afin de produire la vapeur alimentant une centrale électrique.

Dés recherches sur ces deux techniques sont en cours aux Etats-Unis et en URSS, dans l'espoir que, vers l'an 2000, les réacteurs à fusion nucléaire pourront être commercialisés.

Les réacteurs de fusion possèdent de nombreux avantages sur les réacteurs de fission, entre autres la production d'une plus grande quantité d'énergie pour chaque unité de combustible. En outre, il est vraisemblabe que le coût d'investissement pour une centrale de fusion sera moins élevé que pour un réacteur surrégénérateur. Les réacteurs de fusion causeront moins de pollution, car ils n'émettent pas de caesium ou de strontium radioactifs, et il est impossible qu'une centrale devienne incontrôlable et fonde ou explose. Si le procédé de fusion se déréglait, la réaction stopperait instantanément.

Les systèmes utilisant l'*énergie solaire* pour le chauffage et la climatisation des logements ont donné de bons résultats au stade de la démonstration et d'autres aplications pourront être commercialisées dans un délai de cinq ans. D'après l'étude, ces systèmes pourraient devenir un moyen important de conservation de l'approvisionnement en énergie. Mais elle souligne que les investissements de bas sont élevés et que si un moyen pratique d'emmagasiner la chaleur solaire n'est pas trouvé, il faudra recourir à d'autres sources d'énergie afin de soutenir le chauffage solaire pendant la nuit et les longues périodes de mauvais temps. L'embloi à grande échelle de l'énergie solaire pour la production d'électricité ou de combustibles secondaires risque donc d' appartenir encore à un avenir assez éloigné. Une des possibilités consisterait à accumuler l'énergie solaire dans des stations sattelites et de la transmetre à des sations au sol. Une autre implique la création de zones collectrices d'énerggie solaire au sol comme moyen d'utiliser la lumière directe du soleil pour produire de la vapeur, à son tour génératrice d'énergie électrique.

Le charbon continuera de figurer, même à long terme, parmi les principales sources d'énergie; la *magnétohydrodynamique* (MHD) est une technique nouvelle et prometteuse d'utilisation efficace et propre du charbon. Elle offre la possibilité de convertir la chaleur. des gas de combustion directement en électricité. Les centrales MHD pourraient atteindre un rendement de 50, ou même 60 pour cent, comparées aux centrales actuelles à combustibles fossiles (40%). Elles pourraient également constituer l'une des meilleures méthodes d'élimination des oxydes de soufre, et de réduction des émissions d'oxydes d'azote des centrales chaufées au charbon; elles produiraient également moins de pollution thermique.

Les centrales nucléaires et solaires de l'avenir produiront de l'énergie électrique, mais elles pourront également utiliser leur énergie pour créer un gaz d'*hydrogène* — combustible synthétique secondaire présentant de nombreux avantages économiques et écologiques. L'hydrogène peut être produit aisément et emmagasiné économiquement. Lorsqu'il a brûlé, son seul résidu est l'eau. Le transport demeure le principal problème. Dans une future «économie de l'hydrogène», les pipelines relieraient les grandes centrales nucléaires ou solaires aux lieux de consommation de ce gas où ce dernier serait brûlé afin de produir de l'électricité, de la chaleur, ou de l'énergiee mécanique.

movigráfica

tavares, sanches & silva, lda.

Tipografia

Offset

Desenho

Encadernação

Gravura

Timbragem

★

Rua do Espírito Santo, — Telefs. 912337 - 915414

ODIVELAS

Synopsis of articles published in «Técnica» n.° 421

XLIX — October 1974

U. D. C. 621.392.1:621.396.029.1

JOSÉ A. C. SARAIVA MENDES

ANALYSIS OF FADE DURATIONS ON DIFFERENT MICROWAVE PATHS

Técnica N.° 421 — XLIX — 10-1974, p. 23 - 32

This paper reports the analysis of fade durations on three different microwave paths. We have obtained some log-normal distributions when relating the duration of fading. The results are compared wih some CCIR recommendations.

U. D. C. 624.04:518.6

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA
L. F. GONÇALVES DE AZEVEDO

THE CONJUGATED GRADIANT METHOD AND ITS APLICATION IN STRUCTURAL ANALYSIS

Técnica 421 XLIX — 10-1974, p. 1 - 6

It is shown that the use of the conjugated gradiant technique in the solution of the systems of equations associated with the analysis of structures makes it possible to work directly wits the construction of the global stifness matrix.

U. D. C. 551.501:629.19

BETTENCOURT FARIA

METEOROLOGIC SATELLITES

Técnica N.° 421 — XLIX — 10-1974, p. 33 - 44

U. D. C. 539.31:518.6

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA
R. TEIXEIRA DUARTE

A FICTITIOUS FORCE METHOD FOR THE SOLUTION OF GEOMETRICALLY NON-LINEAR PROBLEMS

Técnica N.° 421 — XLIX — 10-1974, p. 7 - 12

A method for the solution of geometrically non-linear problems is presented which is characterized by the use of fictitious forces obtained without resorting to integrations over the elements or to the non-linear form of he strain-displacement equations.

SALGADO PRATA U. D. C. 539.56

INTRODUCTION TO THE MECHANICAL FRACTURE

Técnica 421 — XLIX — 10-1974, p. 13 - 21

The fracture mechanic relates the properties, the compacity faults of materials and its condition of aplication with the fracture phenomenon.

This work presents basic concepts and analytic formulations of the fracture mechanics.

Resumo dos artigos publicados na «Técnica» n.º 421

Ano XLIX — Outubro 1974

C. D. U. 624.04:518.6

E. R. DE ARANTES E OLIVEIRA
L. F. GONÇALVES DE AZEVEDO

O METODO DOS GRADIANTES CONJUGADOS E A SUA APLICAÇAO NA ANALISE DE ESTRUTURAS

Técnica N.º 421 — XLIX — 10-1974, p. 1 - 6

Mostra-se que a utilização do método dos gradiantes conjugados na resolução dos sistemas de equações associadas com a análise de estruturas torna possível trabalhar directamente com a matrizes de rigidez dos elementos e, deste modo, evitar a formação da matriz de rigidez global.

C. D. U. 539.31:518.6

E. R. ARANTES E OLIVEIRA
R. TEIXEIRA DUARTE

UM MÉTODO DE FORÇAS FICTICIAS PARA A RESOLUÇAO DE PROBLEMAS GEOMETRICAMENTE NAO LINEARES

Técnica N.º 421 — XLIX — 10-1974, p. 7 - 12

Apresenta-se um método para a resolução de problemas geometricamente não lineares caracterizado pela utilização de forças ficticias obtidas sem qualquer recurso a integrações sobre os elementos ou à forma não-linear das equações deformações-deslocamentos.

SALGADO PRATA C. D. U. 539.66

INTRODUÇAO A MECANICA DA FRACTURA

Técnica N.º 421 — XLIX — 10-1974, p. 13 - 21

A mecânica da fractura relaciona as propriedades, defeitos de compacidade dos materiais e suas condições de aplicação com o fenómeno da fractura.
Neste trabalho apresenta-se conceitos e formulações analíticas básicos da mecânica da fractura.

C. D. U. 621.392.1:621.396.029.1

JOSÉ A. C. SARAIVA MENDES

ANALISE DA DURAÇAO DO AMORTECIMENTO EM DIFERENTES FEIXES DE MICROONDAS

Técnica N.º 421 — XLIX — 10-1974, p. 23 - 32

Este trabalho expõe a análise feita em três feixes hertzianos de microondas. Essa análise conduziu à obtenção de distribuições log-normais, relacionando a duração dos fenómenos individuais de fading com o seu número e com o tempo total de fading. Os resultados são depois comparados com algumas recomendações do CCIR.

BETTENCOURT FARIA C. D. U. 551.501:629.19

OBTENÇAO DOS DADOS METEOROLÓGICOS ATRAVÉS DE UM SATÉLITE ARTIFICIAL

Técnica N.º 421 — XLIX — 10-1974, pp 33 - 44

Publicações Recebidas

PUBLICAÇÕES PERIÓDICAS

— ALL-UNION MONTHLY JOURNAL OF ENGINEERING PHISICS
Minsk URSS

— AGRICULTURA
Direcção Geral dos Serviços Agrícolas

— ANNALES
Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics

— AR COMPRIMIDO
Atlas Copco

— ANALYTICAL ABSTRACTS
Society for Analytical Chemistry

— ACTA TECHNICA
Academial Scientiarum Hungarical

— BULLETIN
Agence Internacionale de l'energie Atomique

— BULLETIN
Chambre de Commerce Belge au Portugal

— BOLETIM
Ordem dos Engenheiros

— BOLETIM DE MINAS
Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos

— BOLETIM
Porto de Lisboa

— BOLETIM
Serviços Cartográficos do Exército

— BOLETIM DE INFORMAÇÃO
L. N. E. C.

— BOLETIM
Associação Industrial de Angola

— BOLETIM INFORMATIVO TRANOR
Instituto Nacional de Racionalizacion y Normalizacion

— CEL-CAT
Cel-Cat

— COLECTION
Czechoslovak Shemical Communications

— CONSTRUCTII
Ministerului Construtiilor Industrial

— CHEMICA SCRIPTA
The Royal Swedish Academy of Sciences

— CORTIÇA
Instituto dos Produtos Florestais

— CRONACHE DI CHIMICA

— COURRIER CERN
Organization Européene Pour la Recherce Nucléaire

— CHEMICAL EDUCATIONAL
Division of Chemical Educations of the American Chemical Society

— CEMENTO HORMIGON
Revista Técnica — Barcelona

— DYNA
Associacion Nacional de Ingineros Industriales de España

— ELECTRICIDADE
Revista Técnica Portuguesa

— INDÚSTRIA DO NORTE DE PORTUGAL
Associação Industrial Portuense

— JOURNAL OF CHEMICAL EDUCATION
American Chemical Socity

— LA INGINIERIA
Publication de Centro Argentino de INGINIEROS

— LA RECHERCHE AEROSPATIALE
Recherche Aerospatiale — Paris

— METALURGIA AND METAL FORMING
National Association of Drop Furgers and Stampers

— MODERN CASTING
American Foudrimen's Society

— PRELO
Revista Nacional de Artes Gráficas

— RAIL INTERNACIONAL
Association International du Congrés des Chamins de Fer et de L'union Internationale des Chemics de Fer

— TECHNIQUES FRANÇAISES
Services Économiques de L'ambassade de France

— ECONOMIC REVIEW
Câmara do Comércio Luso-Britânica

— ESTUDOS NOTAS E TRABALHOS
Serviço de Fomento Mineiro

— FOMENTO
Técnicas e Economia Ultramarina
Centro de Documentação Técnico-Económica Lisboa

— FUNDIÇÃO
Associação Portuguesa de Fundição

— INFORMÁTICA
Associação Portuguesa de Informática

— IVON
Revista Española de Química Aplicada

— INDUSTRIA PORTUGUESA
Orgão da Associação Industrial Portuguesa

— INDÚSTRIA DE MOÇAMBOQUE
Orgão da Associação Industrial de Moçambique

— IMME
Boletim Técnico

PUBLICAÇÕES NÃO PERIÓDICAS

— HANDBOOK OF SYNCHRONOUS DRIVE COMPONENTS

— ESTATÍSTICAS INDUSTRIAIS 1973

— ANUÁRIO DOS SERVIÇOS HIDRÁULICOS 66/67

— O EMPREGO NO SECTOR TERCIÁRIO METROPOLITANO

— EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE OBSTÁCULOS SALIENTES DE MARGENS

— MEMÓRIAS E NOTÍCIAS
Estudos Geológicos

— ASPECTOS DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL SÓCIO ECONÓMICO

— ASPECTOS GLOBAIS DO PROBLEMA DO EMPREGO EM PORTUGAL COTINENTAL
(Gabinete de Planeamento do Ministério do Trabalho)

— COURS D'ALGEBRE GÉNÉRALE
António Almeida Costa

— CONTRIBUIÇÃO PARA O ESTUDO DE UMA CENTRAL HIDROELÉCTRICA ASSENTE SOBRE FUNDAÇÃO DEFORMÁVEL (LNEC)

— THE INFLUENCE OF WATER TEMPERATURE ON THE ROUGHNESS OF ALLUVIAL FLOWS (LNEC)

— ALUMÍNIO ANODIZADO PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL (LNEC)

— ESTATÍSTICAS DA CONSTRUÇÃO E DA HABITAÇÃO
(Instituto Nacional de Estatística)

técnica

REVISTA DE ENGENRARIA DA ASSOCIAÇÃO DOS ESTUDANTES DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO

ÍNDICE POR ASSUNTOS DOS ARTIGOS PUBLICADOS

NÚMEROOS 416 A 420 VOLUME XXXIV OUTUBRO DE 1972 A SETEMBRO DE 1974

Artigo	N.º	Data	Pág.
37 — EDUCAÇÃO			
C. D. U. 37.01			
34 — Teses sobre o ensino ..... *Helder Coelho*	420	9-974	215
A noção do problema — Tópicos para o estudo do lugar ocupado pelos «problemas» no modelo de ensino de uma ciência em Portugal ..... *Helder Coelho*	420	9-974	219
C. D. U. 371.214:538			
Relatório sobre o ensino da cadeira de Física III (electromagnetismo) do I. S. T. ..... *António M. S. S. L. C. Brotas*	420	9-974	233
C. D. U. 371.214:624			
Proposta para reestruturação dos cursos de Engenharia Civil ... *E. R. Arantes e Oliveira, A. Carvalho Quintela, A. F. Tovar de Lemos*	420	9-974	227
C. D. U. 371.3:627			
O ensino da Engenharia de recursos hídricos ..... *L. Veiga da Cunha*	420	9-974	223
C. D. U. 378.1			
Faculdade de Engenharia da U. P. *Regulamento Provisório*	420	9-974	237
5 — CIÊNCIAIS PURAS			
5.1 — MATEMÁTICA			
C. D. U. 512.879			
Formas matriciais no cálculo de afinores (II) ..... *João Reis Simões*	417	11-972	97
C. D. U. 519.34			
Teoremas de convergência nos métodos variacionais ..... *E. R. Arantes e Oliveira*	418	12-972	111
53 — FÍSICA			
C. D. U. 532.517.4:532.574.6			
The evaluations of hot-wire signals in highly turbulent flows ... *D. F. G. Durão, J. H. Whitelaw*	420	9-974	253
C. D. U.532.544			
Investigações experimentais em jactos coaxiais	419	1-973	181
C. D. U. 537.311.6:621.3.126			
Considerações sobre a indutância de uma máquina de corrente contínua ..... *Olivério D. D. Soares*	419	1-973	165
54 — QUÍMICA - MINERALOGIA			
C. D. U. 54.02-14:681.117.8:519.2			
Aplicações do método de Monte Carlo ao estudo de fluídos *C. A. Nieto de Castro, M. Nunes da Ponte, V. A. Meira Soares*	417	11-972	101
C. D. U. 541.486:541.63:541.486			
Two conferences on coordlinatino Chemistry	416	10-972	49
55 — GEOLOGIA			
C. D. U. 551.311.22/620.199/691.2:5392.15.539.215			
Análise Laboratorial da influência de gravidade na altarabilidade das rochas ..... *L. Aires Barros*	417	11-972	65
6 — CIÊNCIAS APLICADAS			
C. D. U. 600			
A crise do ambiente ..... *J. J. Delgado Domingos*	417	11-972	57
62 — ENGENHARIA			
620 — ENSAIOS E ACÇÕES FÍSICAS SOBRE OS MATERIAIS			
C. D. U. 620.17			
A teoria das linhas de escorregamento—Aplicação à extrusão *A. Duarte Silva, E. C. Marçal Grilo*			
C. D. U. 620.17:624.073.12			
Resposta elástica de uma laje circular ..... *M. A. Gonçalves da Silva*	417	11-972	71

Artigo N.º Data Pág.

621 — ENGENHARIA MECÂNICA
ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA

C. D. U. 621.039.5

Determinação experimental da função de tranferência do reactor Português de investigação à potência zero 419 1-973 191
J. M. Costa Oliveira
C. A. Morais de Veiga

C. D. U. 621.165 + 621.438:621.018

Nota sobre condições de rendimento máximo duma turbina isentrópica 418 12-972 137
António Leite

C. D. U.621.3.011.1

Algoritmo para a análise topológica de redes 417 11-972 79
J. F. Borges da Silva

C. D. U. 621.396:551.596.7

Medidas de atenuação a 11GHz em ambiente chuvoso 419 1-973 171

C. D. U. 621.43

Rotor e taxa de compressão de motores tipo Wankel 416 10-972 7
Diamantino F. G. Durão

C. D. U.621.785

Transformações no revenido dos aços martensíticos com 12% de crómio 416 10-972 1
Rui Nunes Correia

624 — ENGENHARIA CIVIL

C. D. U. 624.041.2:518.6

Viga angular simétrica de barras perpendiculares 420 9-974 265
J. S. Brasão Farinha

C. D. U. 624.07:518.5

O efeito da deformabilidade axial das barras no cálculo de estruturas porticadas de grande altura 416 10-972 31
L. G. Braga da Cruz

C. D. U. 624.131.25:624.131.439:553.54

Deformabilidade de rochas xistosas 416 10-972 25
J. Loureiro Pinto

C. D. U. 624.131.439:539.501

Sobre a reologia de areias 418 12-972 117
F. Machado
M. E. Corte-Real

Artigo N.º Data Pág.

628 — ENGENHARIA E TECNOLOGIA SANITÁRIAS

C. D. U. 628

A engenharia sanitária 416 10-972 53
J. Soares Amaro

65 — CIÊNCIAS COMERCIAIS
TRANSPORTES

C. D. U. 656.01

Alguns conceitos básicos relativos à problemática dos transportes 419 1-973 159
A. N. Pires Cameira

C. D. U. 658.7

Função aprovisionamento — Gestão de stocks, sua influência na economia das empresas e dos países 419 1-973 211
J. Prista Caetano

66 — INDÚSTRIAS QUÍMICAS

C. D. U. 66.065.5:548.5

Interpreting sieve analyses of products of industrial crystalizes 418 12-972 149
C. Pedro Nunes

C. D. U. 666.942

Microscopia quantitativa de clíqueres e cimentos Portland 418 12-972 125
M. Olinda Braga

69 — INDÚSTRIAS DE CONSTRUÇÃO

C. D. U. 691.175 — 498:624.2:625.8

O neopreno como tapa-juntas em pontes e pavimentos rodoviários 420 9-974 239
Acácio da Conceição

C. D. U. 691.327:620.197.14

Protecção de depósitos e outras estruturas em betão por meio de revestimento 417 11-972 87
Acácio da Conceição

77 — FOTOGRAFIA

C. D. U. 771.1:778.37:535 - 3

O laboratório de fotografia a ultra-alta velocidade da Universidade de Luanda 418 12-972 143
C. Dinis da Gama

VICENTE FERREIRA E BRAZÃO FARINHA

TABELAS TÉCNICAS

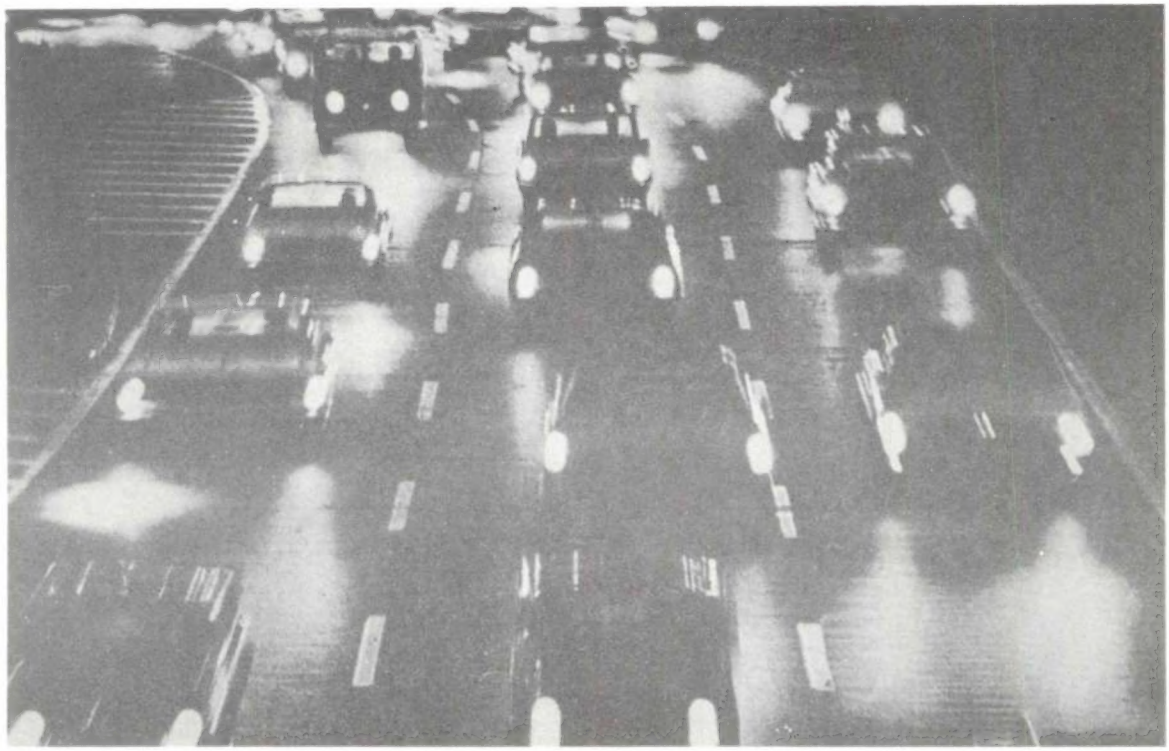
técnica

REVISTA DE ENGENHARIA DA ASSOCIAÇÃO DOS ESTUDANTES
DO INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO - LISBOA

7ª EDIÇÃO REVISTA E ACTUALIZADA
PREÇO 250.00
DESC. 10% AOS ASSINANTES

ARRANQUE INSTANTÂNEO

TORRENTES DE LUZ



COM BATERIAS - PILHAS SECAS

TUDOR

novas instalações de vendas e assistência técnica:

em **LISBOA** · R. Alferes Malheiro, 5 A-B Tel. 73 06 81 (À AV. BRASIL)
no **PORTO** · Av. da Boavista, 746-754 Tel. 694049